

## 明 細 書

### マイクロアクチュエータ、およびマイクロアクチュエータを備えた装置 技術分野

[0001] 本発明は、傾動と垂直変位とが可能なマイクロアクチュエータ、およびそのマイクロアクチュエータを備えた装置に関する。

### 背景技術

[0002] MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を用いて多様なマイクロアクチュエータが作製され、光学、高周波回路、バイオテクノロジーなど様々な分野へのマイクロアクチュエータの応用が期待されている。例えば補償光学 (Adaptive Optics) 分野では、光の波面を制御するためのマイクロミラーアレイが開発されている。こうした用途では、光の波面を滑らかに制御するために、1つ1つの光反射面を基台に対して傾動させると同時に垂直変位をさせることが有効である。

[0003] このような傾動と垂直変位とが可能なマイクロアクチュエータの例は、非特許文献1に開示されている。図10は、非特許文献1に開示されるマイクロアクチュエータ1000を模式的に示す斜視図である。

[0004] 可動電極100は、その外周部を3本の弾性梁101a、101bおよび101cにより支持されている。また、可動電極100は3つの固定電極102a、102bおよび102cと対向している。固定電極102a、102bおよび102cは、それぞれ独立に駆動電圧を印加可能に設けられ、可動電極100との間で電位差が与えられる。これにより、可動電極100を吸引する方向に静電力が発生する。

[0005] 固定電極102a〜102cの駆動電圧を同一に設定すれば、可動電極100はほぼ傾動せずに下方向に垂直変位する。また、これらの駆動電圧を互いに異ならせれば、可動電極100は所望の方向に傾動しながら下方向に垂直変位する。このように、可動電極100は下方向への垂直変位と同時に2軸の傾動が可能である。

[0006] ミラー103は、接合部104において可動電極100と接合されているため、可動電極100の変位がそのままミラー103の変位を決定する。

非特許文献1: U. Srinivasan, et al., "Fluidic Self-Assembly of Micro



mirrors Onto Microactuators Using Capillary Forces”, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 8, No. 1, pp. 4–11 (January, 2002)

## 発明の開示

### 発明が解決しようとする課題

- [0007] しかしながら、上記のようなマイクロアクチュエータ1000は、固定電極の駆動信号とミラー変位との関係における非対角性が大きいという課題がある。ここで、非対角性とは、ある固定電極に所定の電圧を印加し、その固定電極に対向する側の可動電極100の一端が垂直方向に変位した場合に、他の固定電極に対向する側の可動電極100の端部も垂直方向に変位してしまうことを指す。
- [0008] 図11を参照して、この課題を説明する。図11は、マイクロアクチュエータ1000の動作を示す図である。図11は模式化したマイクロアクチュエータ1000の断面図であるので、可動電極100と、2本の弾性梁101aおよび101bと、2つの固定電極102aおよび102bのみが図示されている。固定電極102aが可動電極100に及ぼす駆動力の作用点aは、固定電極102aのうちの駆動力が発生する領域の中心を通り固定電極102aに垂直な軸を通る点である。固定電極102bが可動電極100に及ぼす駆動力の作用点bは、固定電極102bのうちの駆動力が発生する領域の中心を通り固定電極102bに垂直な軸を通る点である。
- [0009] ここでは、固定電極102aのみに所定の電圧を印加して可動電極100を吸引した場合を説明する。固定電極102aは駆動力Fを発生し、作用点aにおいて可動電極100は垂直方向に $\delta$ だけ変位する。このとき、駆動力を発生していない固定電極102bに対向する作用点bにおいても可動電極100は垂直方向に $\delta'$ だけ変位している。ここで、この変位 $\delta'$ と変位 $\delta$ との比の値 $\delta'/\delta$ を非対角性の大きさの指標とする。
- [0010] 可動電極100の姿勢制御の観点から、こうした非対角性は小さい方がよい。非対角性が変位の目標分解能に対して十分小さければ、各作用点aおよびbにおける可動電極100の変位を、対応する固定電極への印加電圧によりそれぞれ独立して制御できるので、制御装置を簡素な構成にすることができる。また、非対角性に起因する変位(例えば $\delta'$ )を補正する制御を行う場合でも、非対角性が小さいほど制御の



高精度化と簡素化が容易となる。特に静電駆動の場合は駆動力が吸引方向にしか発生しないため、 $\delta'$ の大きさを0に戻す方向への補正制御が難しい。また、マイクロアクチュエータの特性のばらつきが大きい場合は非対角性に起因する変位の補正のためのデータ量が膨大になってしまう。特に、マイクロアクチュエータを多数備える装置(マイクロミラーアレイ等)において上述の非対角性が大きいと、非対角性に起因する変位の補正のためのデータ量が膨大になってしまう。このことは、著しいコストの増大およびマイクロアクチュエータの駆動速度の低下の原因となる。このような点から、非対角性は小さい方が望ましい。

[0011] しかしながら、図10および図11から明らかなように、可動電極100の外周部を支持して、その内側に固定電極を形成した構成では、1つの固定電極102aによって発生する駆動力Fによって可動電極100の全ての位置が下方向に変位してしまう。このため、非対角性が極めて大きい。補正制御の高精度化および簡素化を考慮すると、非対角性  $\delta' / \delta$  は1/3以下であることが望ましいが、従来のマイクロアクチュエータ1000の構成では、設計上の工夫をしても非対角性を1/3以下にすることは極めて困難であった。

[0012] 本発明は、上記課題に鑑みてなされたものであり、その目的は、駆動力と可動部の変位との非対角性を小さくしたマイクロアクチュエータ、およびそのマイクロアクチュエータを備えた装置を提供することにある。

#### 課題を解決するための手段

[0013] 本発明のマイクロアクチュエータは、基台と、前記基台に対して変位可能な可動部と、前記可動部の前記基台に対する垂直方向の変位、および前記基台に対する傾動が可能となるように前記可動部を支持する弾性支持部と、前記基台に対して前記可動部を変位させる複数の駆動部とを備え、前記複数の駆動部は、第1の駆動部と第2の駆動部とを含み、前記第1の駆動部が前記可動部に及ぼす第1の駆動力の第1の作用点と、前記第2の駆動部が前記可動部に及ぼす第2の駆動力の第2の作用点との間の位置で、前記弾性支持部は前記可動部を支持しており、前記可動部の前記基台に対する垂直方向への変位に応じて前記弾性支持部に生じる復元力のバネ定数を $kz$  (N/m)、前記可動部の前記基台に対する傾動角度に応じて前記弾性



支持部に生じる復元トルクのバネ定数を $kr$  (Nm/rad)、前記第1の作用点と前記第2の作用点との間の距離を $2L$  (m) とするとき、前記 $kz$ と前記 $kr$ と前記 $L$ とが、 $0.5 \leq L^2 \cdot kz / kr \leq 2$  の関係を満たすことを特徴とする。

[0014] 本発明のマイクロアクチュエータは、基台と、前記基台に対して変位可能な可動部と、前記可動部の前記基台に対する垂直方向の変位、および前記基台に対する2軸の傾動が可能となるように前記可動部を支持する弾性支持部と、前記基台に対して前記可動部を変位させる複数の駆動部とを備え、前記複数の駆動部が前記可動部に及ぼす駆動力が作用する複数の作用点で囲まれた位置で、前記弾性支持部は前記可動部を支持しており、前記可動部の前記基台に対する垂直方向への変位に応じて前記弾性支持部に生じる復元力のバネ定数を $kz$  (N/m)、前記可動電極の前記2軸の傾動における傾動角度に応じて前記弾性支持部に生じる復元トルクのバネ定数を $k_{rx}$  (Nm/rad) および $k_{ry}$  (Nm/rad)、前記複数の作用点のそれぞれと前記弾性支持部が前記可動部を支持している前記位置との間の距離を $R$  (m) としたときに、前記 $kz$ と前記 $k_{rx}$ と前記 $k_{ry}$ と前記 $R$ とが、 $1 \leq R^2 \cdot kz / k_{rx} \leq 5$ 、 $1 \leq R^2 \cdot kz / k_{ry} \leq 5$ 、 $0.67 \leq k_{rx} / k_{ry} \leq 1.5$  の関係を満たすことを特徴とする。

[0015] ある実施形態において、前記弾性支持部は、前記可動部の概ね中央部を支持している。

[0016] ある実施形態において、前記可動部の少なくとも一部は導電性を有し、前記複数の駆動部のそれぞれは前記可動部と対向する電極を備え、前記複数の駆動部のそれぞれは、前記可動部と前記電極との間に生じる静電力により前記可動部を駆動する。

[0017] ある実施形態において、前記複数の駆動部は、前記弾性支持部が前記可動部を支持している位置を通り前記基台に垂直な軸を中心に概ね対称に配置されている。

[0018] ある実施形態において、前記弾性支持部は、前記基台に接続された第1端部と、前記可動部に接続された第2端部とを備え、前記第1端部と前記第2端部との間の距離を $H$  としたときに、前記 $H$ と前記 $R$ とが、 $0.8 \leq H / R \leq 1.6$  の関係を満たす。



- [0019] ある実施形態において、前記第1端部と前記可動部の中央部との間の距離は、前記第2端部と前記可動部の中央部との間の距離よりも長い。
- [0020] ある実施形態において、前記弾性支持部は梁部を備え、前記梁部は、前記梁部の延びる方向が反転している折り返し部を備える。
- [0021] ある実施形態において、前記折り返し部と前記可動部の中央部との間の距離は、前記弾性支持部の前記基台に接続された位置と前記可動部の中央部との間の距離よりも長い。
- [0022] ある実施形態において、前記複数の駆動部のうちの1つが前記可動部を駆動して前記可動部の一端が前記基台に近づく方向に変位した場合に、前記可動部の他端は前記基台から離れる方向に変位する。
- [0023] ある実施形態において、前記 $k_z$ と前記 $k_r$ と前記 $L$ とが、 $1 \leq L^2 \cdot k_z / k_r$ の関係を満たす。
- [0024] ある実施形態において、前記 $k_z$ と前記 $k_{rx}$ と前記 $k_{ry}$ と前記 $R$ とが、 $2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx}$ 、 $2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry}$ の関係を満たす。
- [0025] 本発明の装置は、前記マイクロアクチュエータを複数個備え、前記複数のマイクロアクチュエータは、前記基台を互いに共有していることを特徴とする。
- [0026] 本発明の装置は、前記マイクロアクチュエータを複数個備え、前記複数のマイクロアクチュエータは、前記基台を互いに共有しており、前記複数のマイクロアクチュエータのうちの互いに隣接するマイクロアクチュエータ同士のピッチを $P(m)$ としたときに、前記 $P$ と前記 $R$ とが、 $0.29 \leq R/P \leq 0.37$ の関係を満たすことを特徴とする。
- [0027] ある実施形態において、前記装置は、前記複数の駆動部に制御信号を出力して、前記可動部の変位を制御する制御部をさらに備える。
- [0028] ある実施形態において、前記制御部は、前記可動部を3段階以上に変位可能である。
- [0029] ある実施形態において、前記制御部は、前記複数の駆動部のうちの前記制御信号を受け取る駆動部が前記可動部に及ぼす駆動力の作用点の目標変位量に応じた前記制御信号を出力する。



- [0030] ある実施形態において、前記可動部は光反射面を備える。
- [0031] ある実施形態において、前記装置は、光を発生する光源をさらに備える。
- [0032] ある実施形態において、前記装置は、前記光反射面を通った光を受け取り、前記光の波面状態を示す波面情報を生成する波面情報生成部をさらに備え、前記制御部は、前記波面情報に応じて前記可動部を変位させる。

### 発明の効果

- [0033] 本発明によれば、弾性支持部が可動部を複数の作用点の間あるいは複数の作用点で囲まれた位置で支持する。また、可動部の垂直方向への変位に応じたバネ定数と、可動部の傾動角度に応じたバネ定数との間に特定の関係を持たせている。これにより、駆動部の駆動力と可動部の変位との非対角性を小さくする(すなわち対角性を大きくする)ことができ、マイクロアクチュエータの制御の高精度化および簡素化を容易に実現することができる。また、マイクロアクチュエータを制御する制御装置を簡素な構成にすることができる。
- [0034] 本発明によれば、駆動部の駆動力と可動部の変位との非対角性は小さく、可動部中の作用点のそれぞれの位置における変位は、互いに干渉せず独立に制御することができるので、制御の簡素化と高精度化とを実現することができる。

### 図面の簡単な説明

- [0035] [図1A]本発明の実施形態1によるマイクロアクチュエータを模式的に示す分解斜視図である。
- [図1B]本発明の実施形態1によるマイクロアクチュエータアレイを模式的に示す分解斜視図である。
- [図2A]本発明の実施形態1によるマイクロアクチュエータの1次元モデルでの動作説明図である。
- [図2B]本発明の実施形態1によるマイクロアクチュエータの1次元モデルでの動作説明図である。
- [図3A]本発明の実施形態1によるマイクロアクチュエータを模式的に示す平面図である。
- [図3B]本発明の実施形態1によるマイクロアクチュエータの2次元モデルでの動作説



明図である。

[図3C]本発明の実施形態1によるマイクロアクチュエータの2次元モデルでの動作説明図である。

[図4]本発明の実施形態1によるマイクロアクチュエータを模式的に示す平面図である。

[図5A]本発明の実施形態2によるマイクロアクチュエータを模式的に示す平面図である。

[図5B]本発明の実施形態2によるマイクロアクチュエータの弾性梁の折り返し部周辺を拡大した図である。

[図6A]本発明の実施形態3によるマイクロアクチュエータを模式的に示す平面図である。

[図6B]本発明の実施形態3によるマイクロアクチュエータの弾性支持部に反りがある状態を模式的に示す側面図である。

[図7]本発明の実施形態4によるマイクロアクチュエータを備えた装置を模式的に示す図である。

[図8A]本発明の実施形態4による可動部中の作用点の座標位置と波面近似精度との関係を示す1次元モデルの説明図である。

[図8B]本発明の実施形態4による可動部中の作用点の座標位置と波面近似精度との関係を示す1次元モデルの説明図である。

[図8C]本発明の実施形態4による位相関数の曲率半径と、波面誤差を極小にする距離との関係をプロットした図である。

[図9A]本発明の実施形態4によるマイクロアクチュエータアレイを模式的に示す平面図である。

[図9B]本発明の実施形態4による位相関数の曲率半径と、波面誤差を極小にする距離との関係をプロットした図である。

[図10]従来のマイクロアクチュエータを模式的に示す斜視図である。

[図11]従来のマイクロアクチュエータの動作説明図である。

符号の説明



- [0036] 1 基板  
4a〜4c、14a〜14c、24a〜24c 固定電極  
5、15、25 弾性支持部  
5a、15a、25a 弾性梁  
5h〜5j、15h〜15j、25h〜25j 固定端  
5k〜5m、15k〜15m、25k〜25m 可動端  
15n〜15s、25n〜25p 折り返し部  
6 可動電極  
6b ミラー部  
7 可動部  
10、10a、10b マイクロアクチュエータ  
31 光源  
35 マイクロアクチュエータアレイ  
42 制御部  
47 波面情報生成部

#### 発明を実施するための最良の形態

- [0037] 以下、図面を参照して、本発明によるマイクロアクチュエータ、およびマイクロアクチュエータを備えた装置の実施形態を説明する。

- [0038] (実施形態1)

図1A〜図4を参照して、本発明によるマイクロアクチュエータの第1の実施形態を説明する。

- [0039] まず、図1Aを参照する。図1Aは、本実施形態のマイクロアクチュエータ10を模式的に示す分解斜視図である。

- [0040] マイクロアクチュエータ10は、基台1と、可動部7と、弾性支持部5と、固定電極4a、4bおよび4cとを備える。マイクロアクチュエータ10は、例えばMEMS技術を用いて作製される。基台1は、例えばシリコン基板である。基台1上には駆動回路1aが設けられており、駆動回路1aの上に絶縁層2が設けられている。絶縁層2上には、固定電極4a〜4cおよび接地配線部3が設けられている。可動部7は基台1に対して変位可



能である。弾性支持部5は弾性を有し、基台1の平面方向に対して垂直な方向への可動部7の変位、および基台1に対する可動部7の傾動が可能となるように可動部7を支持している。固定電極4a〜4cのそれぞれは、基台1の平面方向に対して垂直な方向に可動部7を駆動する駆動部として機能する。固定電極4a〜4cおよび接地配線部3の材料として、アルミニウム(Al)合金、ポリシリコンゲルマニウム(Poly-SiGe)等の450℃以下で低温成膜が可能な導電材料が用いられる。固定電極4a〜4cのそれぞれは、絶縁層2に形成されたビア(不図示)によって駆動回路1aに接続されている。駆動回路1aは、所定の電圧の範囲内(例えば0〜30V)の駆動電圧を固定電極4a〜4cにそれぞれ独立して印加することができる。この駆動電圧は例えば10bitの多段階の値として設定され得る。

[0041] 弾性支持部5は、3本の弾性梁5a〜5cと、これらの弾性梁5a〜5cを基台1に固定する固定部5d〜5fと、可動部7を支持するための支持部5gとを備える。弾性梁5a〜5cは接地配線部3に接続されている。ここで、弾性梁5a〜5cの端部のうち、固定部5d〜5fに接続された側の端部を固定端5h〜5j、支持部5gに接続された側の端部を可動端5k〜5mと呼ぶ。

[0042] 弾性支持部5を形成するには、まず、接地配線部3および固定電極4a〜4c上にフォトリソを用いて第1の犠牲層(不図示)を形成し、次に、その第1の犠牲層上に弾性支持部5を形成すればよい。弾性支持部5の材料として、接地配線部3および固定電極4a〜4cと同様の導電材料が用いられる。

[0043] 支持部5gは可動電極6の中央部に設けられた突起6aと接続している。また、3本の弾性梁5a〜5cは支持部5gを介して互いに連結している。

[0044] 可動部7を形成するには、まず、弾性支持部5上にフォトリソを用いて第2の犠牲層(不図示)を形成し、次に、その第2の犠牲層上に可動電極6を形成すればよい。可動電極6は概正六角形の形状を有する。可動電極6の材料として、接地配線部3および固定電極4a〜4cと同様の導電材料が用いられる。可動電極6の上面は光反射面であるミラー部6bとなっている。光反射効率をより高めるために、可動電極6の上面に金や誘電体多層膜等をコーティングしてミラー部6bを形成しても良い。なお、マイクロアクチュエータ10の製造工程において、上述した第1および第2の犠牲層は



最終的には有機溶剤や酸素プラズマ等により除去され、除去された後の部分には空隙が形成される。可動電極6は弾性支持部5および接地配線部3を介して駆動回路1aと接続し、接地電位に保たれている。

[0045] 可動電極6は3つの固定電極4a〜4cと空隙を介して対向している。可動電極6と固定電極4a〜4cとの間に電位差が生じると、可動電極6と固定電極4a〜4cとの間に静電力が生じる。この静電力を駆動力として可動部7を駆動する。この駆動力によって可動部7が変位すると弾性支持部5が弾性的に変形し、弾性支持部5の弾性復元力と駆動力との釣り合いによって可動部7の姿勢が決定する。各固定電極4a〜4cによって発生する駆動力の大きさを制御することにより、可動部7の基台1に対して垂直な方向への変位の量と、基台1に対する傾動の量とを制御することができる。固定電極4a〜4cの駆動電圧を同一に設定すれば、可動部7はほぼ傾動せずに、可動部7の中央部を含む可動部7全体が基台1に近づく方向に垂直変位する。また、これらの駆動電圧を互いに異ならせれば、可動部7は所望の方向に傾動する。ここで、基台1に対する傾動は、基台1の平面方向に平行で互いに直交する2つの傾動軸周りの傾動である。

[0046] 上述の1つのマイクロアクチュエータ10を単位セルとし、複数の単位セルを配列したマイクロアクチュエータアレイ35を図1Bに示す。図1Bはマイクロアクチュエータアレイ35を模式的に示す分解斜視図である。複数のマイクロアクチュエータ10が備える可動部7、弾性支持部5および固定電極4a〜4cは、1枚の基台1上に設けられており、複数のマイクロアクチュエータ10は1枚の基台1を互いに共有している。

[0047] 互いに隣接するマイクロアクチュエータ10同士のピッチPは例えば $110\mu\text{m}$ である。マイクロアクチュエータ10の数は例えば $42\times 36$ 個である。このような複数のマイクロアクチュエータ10を備えたマイクロアクチュエータアレイ35は、マイクロミラーアレイとして機能する。

[0048] 次に、図2A〜図3Cを参照して、固定電極4a〜4cによって発生する駆動力と可動部7の変位との間の非対角性を小さくするための条件を説明する。マイクロアクチュエータ10(図1A)は2軸の傾動と1軸の垂直変位が可能のように弾性支持部5に支持されている。説明の順序として、まず1軸の傾動と1軸の垂直変位を行う1次元モデルを



説明し、次いで2軸の傾動と1軸の垂直変位を行う2次元モデルを説明する。

[0049] 図2Aおよび図2Bは、マイクロアクチュエータ10の1次元モデルでの動作説明図である。図2Aは固定電極4aのみに所定の電圧を印加して可動電極6を吸引した状態を示している。

[0050] 固定電極4aが可動部7の可動電極6に及ぼす駆動力の作用点Aは、固定電極4aのうちの駆動力が発生する領域の中心を通り固定電極4aに垂直な軸を通る点である。固定電極4bが可動電極6に及ぼす駆動力の作用点Bは、固定電極4bのうちの駆動力が発生する領域の中心を通り固定電極4bに垂直な軸を通る点である。弾性支持部5は可動電極6の概ね中央部を支持しているので、1次元モデルでは、作用点Aと作用点Bとの間の位置(中央部O)で弾性支持部5は可動電極6を支持していることになる。この中央部Oを通り基台1(図1A)に垂直な軸を中心に、固定電極4aおよび4bは概ね対称に配置されている。このため、中央部Oと作用点Aとの間の距離および中央部Oと作用点Bとの間の距離はどちらも概ね等しくL(m)である。作用点Aと作用点Bとの間の距離は2Lである。

[0051] 中央部Oにおける可動電極6の基台1に対する垂直変位  $\delta_o$ (m)に応じて弾性支持部5に生じる復元力のバネ定数を $k_z$ (N/m)とし、可動電極6の基台1に対する傾動角度  $\theta$  (rad)に応じて弾性支持部5に生じる復元トルクのパネ定数を $k_r$ (Nm/rad)とする。固定電極4aのみに所定の電圧を印加して可動電極6を吸引した場合に作用点Aに生じる駆動力を $F_a$ (N)、固定電極4bのみに所定の電圧を印加して可動電極6を吸引した場合に作用点Bに生じる駆動力を $F_b$ (N)とする。また、作用点Aにおける可動電極6の垂直方向の変位を $\delta$  (m)とし、作用点Bにおける可動電極6の垂直方向の変位を $\delta'$  (m)とする。このとき、力のつりあいは(式1)で表される。

$$F_a + F_b = (\delta + \delta') / 2 \times k_z \quad (\text{式1})$$

[0052] また、モーメントのつりあいは(式2)で表される。

$$L \cdot (F_a - F_b) = (\delta - \delta') / 2L \times k_r \quad (\text{式2})$$

[0053] 図2Aを参照して、固定電極4aのみに所定の電圧を印加して可動電極6を吸引した場合、作用点Aには駆動力 $F_a$ が発生し、作用点Aにおいて可動電極6は垂直方向に $\delta$ だけ変位する。このとき、駆動力が発生していない作用点Bにおいて可動電



極6は垂直方向に $\delta'$ だけ変位する。この場合、 $F_b=0$ なので、(式1)および(式2)より、

$$F_a = (\delta + \delta') / 2 \times k_z \quad (\text{式3})$$

$$L \cdot F_a = (\delta - \delta') / 2L \times k_r \quad (\text{式4})$$

となり、(式3)および(式4)より、

$$\delta = (1/k_z + L^2/k_r) F_a \quad (\text{式5})$$

$$\delta' = (1/k_z - L^2/k_r) F_a \quad (\text{式6})$$

となる。したがって、非対角性の大きさ $\delta'/\delta$ は、(式7)で与えられる。

[0054] [数1]

$$\frac{\delta'}{\delta} = \frac{1 - (L^2 \cdot k_z / k_r)}{1 + (L^2 \cdot k_z / k_r)} \quad (\text{式7})$$

[0055] (式7)から、 $L^2 \cdot k_z / k_r$ の値を1に近づけることで、非対角性の大きさ $\delta'/\delta$ を所望の値にまで小さくすることが可能であることが判る。非対角性の大きさ $\delta'/\delta$ と、 $L^2 \cdot k_z / k_r$ で与えられる値とには直接的な対応関係が存在し、この関係を(表1)に示す。

[0056] [表1]

非対角性の大きさ $\delta' / \delta$	必要な $L^2 \cdot k_z / k_r$ の条件
0.5	$0.33 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 3$
0.33... (=1/3)	$0.5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$
0.25	$0.6 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 1.67$
0.2	$0.67 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 1.5$
0.1	$0.82 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 1.2$

[0057] 従来のマイクロアクチュエータ1000(図10)ように弾性支持部が可動電極の外周を支持する構成では、非対角性の大きさ $\delta'/\delta$ を1/3以下にすることは非常に困難であることは既に説明した。これに対し、本発明のマイクロアクチュエータ10は、弾性支持部5が可動部7の概ね中央部Oを支持する構成であり、さらに、バネ定数 $k_z$ および $k_r$ と距離 $L$ とに、

$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$$



の関係を持たせることで、非対角性の大きさ  $\delta' / \delta$  を  $1/3$  以下にすることができる。このように非対角性を小さくすることで、マイクロアクチュエータ10の制御の高精度化および簡素化を容易に実現することができる。また、マイクロアクチュエータを制御する制御装置を簡素な構成にすることができる。

[0058] なお、非対角性の大きさ  $\delta' / \delta$  は  $1/10$  以下であればより望ましい。(表1)よりバネ定数  $k_z$  および  $k_r$  と距離  $L$  とに、

$$0.82 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 1.2$$

の関係を持たせることで、非対角性の大きさ  $\delta' / \delta$  を  $1/10$  以下にすることができる。

[0059] なお、ここでは固定電極4aのみが駆動力を発生する場合を説明したが、固定電極4aおよび4bにそれぞれ任意の駆動力を発生させる場合でも上記の関係は成り立つ。このことを図2Bを参照して説明する。図2Bは固定電極4aおよび4bにそれぞれ独立の電圧を印加して可動電極6を吸引した状態を示している。

[0060] 固定電極4aが発生する駆動力を  $F_a$  (N)、固定電極4bが発生する駆動力を  $F_b$  (N) とする。また、作用点Aにおける可動電極6の垂直方向の変位を  $\delta_a$  (m) とし、作用点Bにおける可動電極6の垂直方向の変位を  $\delta_b$  (m) とする。ここで、 $F_b = 0$  のとき、(式1) および (式2) より、

$$\delta_a = (1/k_z + L^2/k_r) F_a \quad (\text{式8})$$

$$\delta_b = (1/k_z - L^2/k_r) F_a \quad (\text{式9})$$

となり、 $F_a = 0$  のとき、(式1) および (式2) より、

$$\delta_a = (1/k_z - L^2/k_r) F_b \quad (\text{式10})$$

$$\delta_b = (1/k_z + L^2/k_r) F_b \quad (\text{式11})$$

となる。(式8)～(式11)より、変位  $\delta_a$  および  $\delta_b$  と駆動力  $F_a$  および  $F_b$  との関係は(式12)で与えられる。

[0061] [数2]



$$\begin{pmatrix} \delta_a \\ \delta_b \end{pmatrix} = \left[ \frac{1}{kz} + \frac{L^2}{kr} \right] \begin{pmatrix} 1 & \frac{1 - (L^2 \cdot kz / kr)}{1 + (L^2 \cdot kz / kr)} \\ \frac{1 - (L^2 \cdot kz / kr)}{1 + (L^2 \cdot kz / kr)} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_a \\ F_b \end{pmatrix} \quad (\text{式 } 12)$$

[0062] (式12)の右辺の行列において、非対角成分と対角成分との比の値は(式7)を参照して説明した非対角性の大きさと一致している。このことから、バネ定数 $kz$ および $kr$ と距離 $L$ とに、

$$0.5 \leq L^2 \cdot kz / kr \leq 2$$

の関係を持たせることで、固定電極4aおよび4bに任意の駆動力を発生させた場合の作用点AおよびBにおける変位の干渉(固定電極4aによって発生した駆動力の作用点Bの変位に対する干渉、および固定電極4bによって発生した駆動力の作用点Aの変位に対する干渉)を $1/3$ 以下に抑え、作用点AおよびBにおける変位の独立制御性を高めることができる。

[0063] また、さらに $L^2 \cdot kz / kr$ が

$$1 \leq L^2 \cdot kz / kr$$

の条件を満たした場合には、(式12)における非対角項が負の値をとるが、この条件は駆動力として静電力を用いる場合のように駆動力 $F_a$ および $F_b$ が吸引力しか発生しない構成において、非対角性に起因する変位の補正を容易にする。

[0064] この理由を、再び図2Aを参照して説明する。

[0065]  $1 \leq L^2 \cdot kz / kr$

の条件が満たされる場合において、固定電極4aを駆動して発生する駆動力 $F_a$ により可動電極6の作用点A側の一端が基台1に近づく方向に変位したとき、可動電極6の作用点B側の他端は基台1から離れる方向に変位し、作用点Bでの非対角性による変位 $\delta'$ は負の値をとる。この変位を補正するには固定電極4bによって吸引力を発生すればよい。非対角性による変位 $\delta'$ が固定電極4bに近づく方向に発生する場合は、静電力のような吸引力しか発生しない構成でこの変位を補正するのは非常に難しい。しかし、吸引力しか発生しない構成でも、非対角性による変位 $\delta'$ が固定電極4



bから離れる方向に発生する場合は、基本的に駆動力 $F_a$ および $F_b$ の大きさを適切に設定すれば非対角性に起因する変位の補正を容易に行うことができる。これにより、非対角性に起因する変位の補正を行う制御装置を簡素な構成にすることができる。

[0066] 次に、図3A～図3Cを参照して、2軸の傾動と1軸の垂直変位を行う2次元モデルを説明する。図3A～図3Cは、マイクロアクチュエータ10の2次元モデルでの動作説明図である。

[0067] 図3Aは、マイクロアクチュエータ10を模式的に示す平面図であり、可動電極6の中央部Oを原点とするx軸およびy軸を図3Aに示すように設定している。

[0068] 固定電極4aが可動部7の可動電極6に及ぼす駆動力 $F_a$ の作用点Aは、固定電極4aのうちの駆動力 $F_a$ が発生する領域の中心を通り固定電極4aに垂直な軸を通る点である。固定電極4bが可動電極6に及ぼす駆動力 $F_b$ の作用点Bは、固定電極4bのうちの駆動力 $F_b$ が発生する領域の中心を通り固定電極4bに垂直な軸を通る点である。固定電極4cが可動電極6に及ぼす駆動力 $F_c$ の作用点Cは、固定電極4cのうちの駆動力 $F_c$ が発生する領域の中心を通り固定電極4cに垂直な軸を通る点である。弾性支持部5は作用点A、BおよびCで囲まれた位置(本実施形態では可動電極6の概ね中央部)で可動電極6を支持している。固定電極4aと可動電極6とが平行平板電極を形成するとした第1次近似では、作用点Aは可動電極6における固定電極4aとオーバーラップする領域の中心に位置する。作用点BおよびCについても同様である。弾性支持部5が可動電極6を支持している中央部Oを中心として、固定電極4a～4cは回転対称に配置されている。作用点A～Cのそれぞれと中央部Oからの距離は $R(m)$ である。作用点A～Cは、中央部Oを中心とした半径 $R$ の円の円周上に位置し、中央部Oから見て120度の均等な角度間隔で位置している。

[0069] 図3Bはマイクロアクチュエータ10のy軸に沿った断面の模式図、図3Cはマイクロアクチュエータのx軸に沿った断面の模式図である。固定電極4a、4bおよび4cがそれぞれ独立に駆動力 $F_a$ 、 $F_b$ および $F_c$ を発生し、これによって作用点A、BおよびCにおいて可動電極6が基台1に垂直な方向にそれぞれ $\delta_a$ 、 $\delta_b$ および $\delta_c$ だけ変位するものとする。

[0070] 可動電極6の基台1に対する垂直変位 $\delta_o(m)$ に応じて弾性支持部5に生じる復元



力のバネ定数を $kz$  (N/m)、可動電極6の $x$ 軸周りの傾動における傾動角度  $\theta_x$  (rad) に応じて弾性支持部5に生じる復元トルクのパネ定数を $k_{rx}$  (Nm/rad)、可動電極6の $y$ 軸周りの傾動における傾動角度  $\theta_y$  (rad) に応じて弾性支持部5に生じる復元トルクのパネ定数を $k_{ry}$  (Nm/rad) とする。

[0071] 変位  $\delta_a$ 、 $\delta_b$  および  $\delta_c$  と駆動力  $F_a$ 、 $F_b$  および  $F_c$  との関係は (式13) で与えられる。

[0072] [数3]

$$\begin{pmatrix} \delta_a \\ \delta_b \\ \delta_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{k_{rx}} & \frac{1}{kz} - \frac{R^2}{2k_{rx}} & \frac{1}{kz} - \frac{R^2}{2k_{rx}} \\ \frac{1}{kz} - \frac{R^2}{2k_{rx}} & \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{4k_{rx}} + \frac{3R^2}{4k_{ry}} & \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{4k_{rx}} - \frac{3R^2}{4k_{ry}} \\ \frac{1}{kz} - \frac{R^2}{2k_{rx}} & \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{4k_{rx}} - \frac{3R^2}{4k_{ry}} & \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{4k_{rx}} + \frac{3R^2}{4k_{ry}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{pmatrix}$$

(式13)

[0073] (式13)において、 $R^2 \cdot kz / k_{rx}$ の値を2に近づけ、 $k_{rx}$ の値を $k_{ry}$ の値に近づけることで、すべての非対角成分を所望の値にまで小さくできる。このことから、弾性支持部5が可動電極6の中央部Oを支持し、 $R$ 、 $kz$ 、 $k_{rx}$ 、 $k_{ry}$ に特定の関係を持たせることによって、固定電極4a〜4cに任意の駆動力を発生させた場合の作用点A〜Cにおける変位の干渉を所定値以下に抑え、作用点A〜Cにおける変位の独立制御性を高めることができる。

[0074] 非対角性を小さくするのに必要な $R$ 、 $kz$ 、 $k_{rx}$ 、 $k_{ry}$ の条件の一例を(表2)に示す。

[0075] [表2]



非対角性の大きさ	R、kz、krx、kryの条件例
0.33・・・ (=1/3)	$1 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 5$ $1 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 5$ $0.67 \leq krx / kry \leq 1.5$
0.25	$1.1 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 4$ $1.1 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 4$ $0.71 \leq krx / kry \leq 1.4$
0.2	$1.3 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 3.3$ $1.3 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 3.3$ $0.77 \leq krx / kry \leq 1.3$
0.1	$1.6 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 2.5$ $1.6 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 2.5$ $0.87 \leq krx / kry \leq 1.15$

[0076] 弾性支持部5が可動電極6の概ね中央部Oを支持し、バネ定数kz、krxおよびkryと距離Rとに、

$$1 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 5、$$

$$0.67 \leq krx / kry \leq 1.5$$

の関係を持たせることで、1軸の垂直変位と2軸の傾動とを含む3軸の自由度を持つマイクロアクチュエータ10において、非対角性の大きさを1/3以下に小さくすることができる。

[0077] なお、非対角性の大きさは1/10以下であればより望ましい。(表2)より、バネ定数kz、krxおよびkryと距離Rとに、

$$1.6 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 2.5、$$

$$1.6 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 2.5、$$

$$0.87 \leq krx / kry \leq 1.15$$

の関係を持たせることで、非対角性の大きさ $\delta' / \delta$ を1/10以下にすることができる。

[0078] また、さらに $R^2 \cdot kz / kr$ が

$$2 \leq R^2 \cdot kz / krx、$$

$$2 \leq R^2 \cdot kz / kry$$

の条件を満たすことで、1次元モデルを参照して説明したのと同様に、駆動力FaーFcとして吸引力しか発生しない場合でも、非対角性に起因する変位の補正を容易に



することができる。

[0079] 次に図4を参照して、上述したような条件を満たすマイクロアクチュエータ10の具体的な寸法数値を説明する。図4はマイクロアクチュエータ10を模式的に示す平面図である。

[0080] 中央部O、作用点A〜C、距離Rについては図3Aを参照して説明したのでここではその説明を省略する。図4に示すマイクロアクチュエータ10における距離Rは $37\ \mu\text{m}$ である。中央部Oから弾性支持部5の可動端5kまでの距離 $H_1$ は $5.5\ \mu\text{m}$ 、中央部Oから弾性支持部5の固定端5hまでの距離 $H_2$ は $45.5\ \mu\text{m}$ 、中央部Oから弾性支持部5の固定部5dの中心までの距離 $H_3$ は $51\ \mu\text{m}$ である。支持部5gの幅 $W_1$ は $11\ \mu\text{m}$ 、弾性梁5aの幅 $W_2$ は $4\ \mu\text{m}$ 、固定部5dの幅 $W_3$ は $11\ \mu\text{m}$ である。弾性支持部5の厚さは $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ の範囲であることが好ましく、ここでは $0.5\ \mu\text{m}$ である。弾性支持部5の材料をアルミニウム合金(例えばアルミシリコン)とした場合、縦弾性係数は $69\text{GPa}$ 、ポアソン比は $0.35$ である。

[0081] 基台1に接続された側の固定端5hは、可動電極6に接続された側の可動端5kよりも外側に位置し、固定端5hと中央部Oとの間の距離は、可動端5kと中央部Oとの間の距離よりも長い。固定端5hから可動端5kに向けて延在する弾性梁5aの中で、互いに最も離れた2つの部分同士の直線距離をHとする。ここでは、距離Hは弾性梁5aの長さ等に等しく、 $40\ \mu\text{m}$ である。 $kr/k_{rx}$ 、 $kr/k_{ry}$ の値はおよそ距離Hの2乗に反比例するため、距離Hの値を適宜調節して所望の $k_z/k_{rx}$ 、 $kr/k_{ry}$ の値を得ることが可能である。距離Hと距離Rとの関係は

$$0.8 \leq H/R \leq 1.6$$

を満たすように決定するのが好ましい。上記したHおよびRの値( $H=40\ \mu\text{m}$ 、 $R=37\ \mu\text{m}$ )の場合、 $H/R$ の値は $1.08$ となり

$$0.8 \leq H/R \leq 1.6$$

の関係を満たしている。

[0082] 以上の数値を有する弾性支持部5は、 $k_z=1.16\ (\text{N/m})$ 、 $k_{rx}=7.29 \times 10^{-10}\ (\text{Nm/rad})$ 、 $k_{ry}=7.90 \times 10^{-10}\ (\text{Nm/rad})$ の特性を示した。このとき、 $R^2 \cdot k_z/k_{rx}$ 、 $R^2 \cdot k_z/k_{ry}$ 、 $k_{rx}/k_{ry}$ の値はそれぞれ $2.18$ 、 $2.02$ 、 $1.08$ となるため、



$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx} \leq 5,$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry} \leq 5,$$

$$0.67 \leq k_{rx} / k_{ry} \leq 1.5$$

の条件を満たしている。これは(式13)を基に計算すると、非対角性が3%以下となる条件であることが判る。このように、本発明によれば、極めて非対角性が小さいマイクロアクチュエータを実現することができる。

[0083] なお、可動電極6の1辺の長さQは $62 \mu\text{m}$ であり、固定電極4a〜4cおよび弾性支持部5は全て可動電極6の平面領域下に存在するようにしている。

[0084] ここで、1次元モデルを用いて説明した

$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$$

の条件が、2次元モデルにも適用可能であることを説明する。

[0085] 例えば固定電極4aおよび4bの2つに注目すると、固定電極4aおよび4bは、中央部Oを通る傾動軸U(図4)を中心に互いに反対側に振り分けられた平面位置関係を有する。傾動軸Uに関する復元トルク $k_r$ は $k_{rx}$ に等しく、作用点AおよびBのそれぞれと傾動軸Uとの距離Lは $\sqrt{3}R/2$ に等しい。このとき、 $L^2 \cdot k_z / k_r$ は1.58となり、

$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$$

の条件を満たすことがわかる。

[0086] 以上説明したように、本実施形態によれば、可動部7の可動電極6の中央部Oを弾性支持部5が支持し、可動部7の垂直変位および傾動角度に応じたバネ定数に特定の間接性を持たせることによって、駆動力と変位との間の非対角性を小さくすることができる。

[0087] なお、本実施形態では、可動部7が可動電極6を備え、可動電極6と平行平板電極対を形成する固定電極4a〜4cが、可動部7を駆動する駆動部として機能しているが、本発明はこれに限定されるものではなく、駆動部は、可動部に対して基台1と垂直な方向への駆動力を発生するエレメントであれば何でも良い。例えば、固定電極4a〜4cと可動電極6とが垂直楕円電極対を形成してもよい。また、駆動部は、静電力以外の電磁力等、静電力以外の駆動力を発生するエレメントであっても良い。こうした駆動力は非接触力であるのが好ましいが、バネ定数 $k_z$ 、 $k_r$ 、 $k_{rx}$ および $k_{ry}$ と距離L



およびRとの特定の関係に人きな外乱を与えないものであれば、接触力であっても良い。

[0088] また、本実施形態によるマイクロアクチュエータ10は、2軸の傾動と1軸の垂直変位が可能であるが、1次元モデルでの原理説明からも明らかなように、本発明が1軸の傾動と1軸の垂直変位が可能なマイクロアクチュエータについても適用可能であることは言うまでもない。

[0089] また、本実施形態によるマイクロアクチュエータ10は、中央部Oを中心として各構成要素が対称配置された平面形状を有するが、本発明はこれに限定されない。本発明によれば、各構成要素が対称配置されていない構成においても、非対角性を小さくするという効果を得ることが可能である。

[0090] (実施形態2)

図5Aおよび図5Bを参照して、本発明によるマイクロアクチュエータの第2の実施形態を説明する。

[0091] まず、図5Aを参照する。図5Aは、本実施形態のマイクロアクチュエータ10aを模式的に示す平面図である。

[0092] マイクロアクチュエータ10aは、実施形態1におけるマイクロアクチュエータ10の弾性支持部5の代わりに弾性支持部15を備え、固定電極4a〜4cの代わりに固定電極14a〜14cを備える。弾性支持部15の平面形状はミアンダ(meander)形状であり、弾性支持部15の弾性梁15a〜15cは、概180度で梁部の延びる方向が反転している折り返し部15n〜15sを備える。

[0093] 固定電極14a〜14cは、弾性支持部15の占有領域を確保するために、固定電極4a〜4cに比べて面積が小さくなっており、その結果、作用点A〜Cは中央部Oからより離れて位置する( $R=39\mu\text{m}$ )。

[0094] 弾性支持部15は、3本の弾性梁15a〜15cと、これらの弾性梁15a〜15cを基台1(図1A)に固定する固定部15d〜15fと、可動部7(図1A)を支持するための支持部15gとを備える。弾性梁15a〜15cの端部のうち、固定部15d〜15fに接続された側の端部を固定端15h〜15j、支持部15gに接続された側の端部を可動端15k〜15mと呼ぶ。



- [0095] ここでは、弾性梁15aに注目して弾性支持部15の平面形状を説明する。弾性梁15aはミアンダ形状であり、概180度で梁の延在方向を折り返す2つの折り返し部15nおよび15oを有する。弾性梁15aをミアンダ形状にすることで実質的な梁長さが長くなり、バネ定数 $k_z$ 、 $k_{rx}$ 、 $k_{ry}$ を小さくすることができるので、低電圧駆動でも大きな変位が得られるようになる。
- [0096] ここで、中央部Oから可動端15kまでの距離 $H_1$ は $5.5\mu\text{m}$ 、中央部Oから固定端15hまでの距離 $H_2$ は $51.5\mu\text{m}$ 、中央部Oから固定部15dの中心までの距離 $H_3$ は $57\mu\text{m}$ である。また、支持部15gの実効幅 $W_1$ は $13\mu\text{m}$ 、弾性梁15aの幅 $W_2$ は $3\mu\text{m}$ 、固定部15dの幅 $W_3$ は $11\mu\text{m}$ である。弾性支持部15の厚さは $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の範囲が好ましく、ここでは $0.5\mu\text{m}$ である。弾性支持部15の材料をアルミニウム合金とした場合、縦弾性係数は $69\text{GPa}$ 、ポアソン比は $0.35$ である。
- [0097] 弾性梁15aの中で互いに最も離れた2つの部分同士の距離 $H$ は、固定端15hと可動端15kとの直線距離に等しく、 $46\mu\text{m}$ である。 $H$ および $R$ がこれらの値( $H=46\mu\text{m}$ 、 $R=39\mu\text{m}$ )の場合、 $H/R$ の値は $1.18$ となり、 $0.8 \leq H/R \leq 1.6$ の関係を満たしている。
- [0098] 弾性梁15aの梁の全長は $120\mu\text{m}$ であり、距離 $H$ の $2.61$ 倍である。
- [0099] 固定部15d～15fは、隣接するマイクロアクチュエータの固定部と一体に形成され得る。支持部15gは、図5A中に斜線で示した3箇所でも可動電極6と接続している。接続箇所を3箇所にしたのは可動電極6と弾性支持部15との接続強度をより高めるためである。接続箇所の位置は概ね中央部Oであればどこでもよい。可動電極6の1辺の長さ $Q$ は $62\mu\text{m}$ である。
- [0100] 上記の数値を有する弾性支持部15は、 $k_z=0.34(\text{N}/\text{m})$ 、 $k_{rx}=2.34\times 10^{-10}(\text{Nm}/\text{rad})$ 、 $k_{ry}=2.57\times 10^{-10}(\text{Nm}/\text{rad})$ の特性を示した。このとき、 $R^2\cdot k_z/k_{rx}$ 、 $R^2\cdot k_z/k_{ry}$ 、 $k_{rx}/k_{ry}$ の値はそれぞれ $2.19$ 、 $2.00$ 、 $1.10$ をとるため、 $1 \leq R^2\cdot k_z/k_{rx} \leq 5$ 、 $1 \leq R^2\cdot k_z/k_{ry} \leq 5$ 、 $0.67 \leq k_{rx}/k_{ry} \leq 1.5$



の条件を満たしている。

[0101] 上記のように弾性梁15aー15cをミアンダ形状にした効果を、弾性梁が直線形状の場合と比較して説明する。

[0102] 弾性梁が直線形状の場合、弾性梁のバネ定数を下げるために梁の長さをn倍に伸ばすと、傾動角度に関するバネ定数kr(またはkrx、kry)はおおよそ $1/n$ となり、垂直変位に関するバネ定数kzはおおよそ $1/n^3$ となる。krとkzとの比の値であるkz/krはおおよそ $1/n^2$ となる。すなわち、nの増加につれてkz/krの値は急速に減少するので、

$$0.5 \leq L^2 \cdot kz / kr \leq 2 \text{あるいは}$$

$$1 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 5$$

の条件を満たすことが難しい。

[0103] これに対し、弾性梁がミアンダ形状の場合は、

$$0.8 \leq H/R \leq 1.6$$

の条件を満たすように距離Hの長さをほぼ保ったまま、梁を複数回折り返すことにより実質的な梁の全長をn倍にすることができる。この場合、傾動角度に関するバネ定数kr(または、krx、kry)がおおよそ $1/n$ となると共に、垂直変位に関するバネ定数kzもおおよそ $1/n$ となる。従って、krとkzとの比kz/krの値はnにほとんど依存せずほぼ一定となる。したがって、弾性梁がミアンダ形状の場合は、梁の折り返し回数を増やすだけで、

$$0.5 \leq L^2 \cdot kz / kr \leq 2 \text{あるいは}$$

$$1 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 5$$

の関係を満たしたままバネ定数を小さくすることができる。

[0104] 弾性梁がミアンダ形状の場合に、垂直変位に関するバネ定数kzが $1/n^3$ でなく、 $1/n$ に比例して変化する理由を、図5Bを参照して説明する。

[0105] 図5Bは、弾性梁15aの折り返し部15o周辺を拡大した図である。上側の図は折り返し部15oの平面図、下側の図は折り返し部15oの側面図である。



- [0106] 折り返し部15oにおける弾性梁15aの撓み角を $\phi$ とすると、点 $S_1$ から $S_2$ に至る微小変位 $\Delta x$ に対する垂直変位の変化量 $\Delta \varepsilon (S_1 \rightarrow S_2)$ は $\phi \Delta x$ となる。
- [0107] 点 $S_3$ から $S_4$ に至る微小変位 $(-\Delta x)$ に対する垂直変位の変化量 $\Delta \varepsilon (S_3 \rightarrow S_4)$ を考えた場合は $(-\phi \Delta x)$ の項が存在する。このため、点 $S_1$ から $S_4$ に至る垂直変位を考えた場合は $\phi$ の項は相殺されてより高次の $\Delta \phi \Delta x$ の項が残る。
- [0108] このように、折り返し部で弾性梁の延在方向を反転させているために、弾性梁の撓み角成分に関する垂直変位が一部相殺されて小さくなる。この結果、バネ定数 $kz$ の特性を $1/n^3$ よりも $1/n$ に近づけることができる。
- [0109] 以上説明したように、本実施形態によれば、弾性支持部15が梁の延在方向を反転させる折り返し部15n〜15sを備えているために、バネ定数 $kz$ とバネ定数 $kr$ との比の値をほとんど変えることなく、梁の低剛性化を実現することができる。これによって、非対角性を小さくする効果と、低電圧駆動で可動部7の大きな変位を得る効果との両方が得られる。
- [0110] (実施形態3)
- 図6Aおよび図6Bを参照して、本発明によるマイクロアクチュエータの第3の実施形態を説明する。
- [0111] まず、図6Aを参照する。図6Aは、本実施形態のマイクロアクチュエータ10bを模式的に示す平面図である。
- [0112] マイクロアクチュエータ10bは、実施形態2におけるマイクロアクチュエータ10aの弾性支持部15の代わりに弾性支持部25を備え、固定電極14a〜14cの代わりに固定電極24a〜24cを備える。弾性支持部25の固定端25h〜25jは、折り返し部25n〜25pよりも中央部Oに近い位置に配置されている。
- [0113] 固定電極24a〜24cは、作用点A〜Cと中央部Oとの距離Rが $38.5 \mu m$ となる位置に配置されている。
- [0114] 弾性支持部25は、3本の弾性梁25a〜25cと、これらの弾性梁25a〜25cを基台1(図1A)に固定する固定部25d〜25fと、可動部7(図1A)を支持するための支持部25gとを備える。弾性梁25a〜25cの端部のうち、固定部25d〜25fに接続された側の端部を固定端25h〜25j、支持部25gに接続された側の端部を可動端25k〜25



mと呼ぶ。

[0115] ここでは、弾性梁25aに注目して弾性支持部25の平面形状を説明する。弾性梁25aの形状は、概180度で梁の延在方向を折り返す奇数個(ここでは1つ)の折り返し部25nを有するミアンダ形状である。折り返し部25nと中央部Oとの間の距離は、固定部25dと中央部Oとの間の距離よりも長い。

[0116] ここで、中央部Oから可動端25kまでの距離 $H_1$ は $6\mu\text{m}$ 、中央部Oから固定端25hまでの距離 $H_2$ は $17.5\mu\text{m}$ 、中央部Oから固定部25dの中心までの距離 $H_3$ は $10\mu\text{m}$ である。また、支持部25gの実効幅 $W_1$ は $9\mu\text{m}$ 、弾性梁25aの幅 $W_2$ は $3\mu\text{m}$ である。弾性支持部25の厚さは $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の範囲が好ましく、ここでは $0.5\mu\text{m}$ である。弾性支持部25の材料をアルミニウム合金とした場合、縦弾性係数は $69\text{GPa}$ 、ポアソン比は $0.35$ である。

[0117] 弾性梁25aの中で互いに最も離れた2つの部分同士の距離 $H$ は $41.5\mu\text{m}$ であり、本実施形態では可動端25kと折り曲げ部25nとの距離がこれに相当する。 $H$ および $R$ がこれらの値( $H=41.5\mu\text{m}$ 、 $R=38.5\mu\text{m}$ )の場合、 $H/R$ の値は $1.08$ となり、 $0.8 \leq H/R \leq 1.6$ の関係を満たしている。

[0118] 弾性梁25aの梁の全長は $74.5\mu\text{m}$ であり、距離 $H$ の $1.8$ 倍である。

[0119] 上記の数値を有する弾性支持部25は、 $k_z=0.55(\text{N}/\text{m})$ 、 $k_{rx}=3.70 \times 10^{-10}(\text{Nm}/\text{rad})$ 、 $k_{ry}=4.08 \times 10^{-10}(\text{Nm}/\text{rad})$ の特性を示した。このとき、 $R^2 \cdot k_z / k_{rx}$ 、 $R^2 \cdot k_z / k_{ry}$ 、 $k_{rx} / k_{ry}$ の値はそれぞれ $2.20$ 、 $2.00$ 、 $1.10$ をとるため、

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx} \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry} \leq 5、$$

$$0.67 \leq k_{rx} / k_{ry} \leq 1.5$$

の条件を満たしている。

[0120] 図6Bを参照して、弾性支持部25の固定端25h～25jを折り返し部25n～25pよりも中央部Oに近い位置に配置することにより得られる効果を説明する。

[0121] 図6Bは、弾性支持部25に反りがある状態を模式的に示す側面図である。

[0122] 弾性支持部25は、例えば成膜プロセス時に生じた残留応力勾配等により反りを発



生することがある。この反りの影響により支持部25gと固定部25dとの間で垂直方向の高さ誤差 $\Delta z$ が生じる。この反りの曲率半径を $\rho$ とすると、 $\Delta z$ は近似的に

$$\Delta z = H_3^2 / (2\rho)$$

と表される。

[0123] 従って、中央部Oから固定部25dの中心までの距離 $H_3$ を小さくするほど、高さ誤差 $\Delta z$ はその自乗に比例して小さくすることができる。固定端25h〜25jを折り返し部25n〜25pよりも中央部Oに近い位置に配置することで距離 $H_3$ を小さくすることができる。

[0124] 以上説明したように、本実施形態によれば、弾性支持部25の固定端25h〜25jを折り返し部25n〜25pよりも中央部Oに近い位置に配置している。このため、例えば成膜プロセス時に生じた残留応力勾配等により弾性支持部25に反りが発生した場合にも、可動電極6の垂直方向の高さ誤差 $\Delta z$ を小さく抑えることができる。むしろ、実施形態2で説明した非対角性を小さくする効果と低電圧駆動で可動部7の大きな変位を得る効果をも得られることは言うまでもない。

[0125] (実施形態4)

図7〜図9Bを参照して、本発明のマイクロアクチュエータを備えた装置の実施形態を説明する。

[0126] まず、図7を参照する。図7は、本実施形態のマイクロアクチュエータを備えた装置30を模式的に示す図である。本発明のマイクロアクチュエータを備える装置は、例えば光ディスクに対して情報の記録再生を行う光ピックアップまたは光ディスク装置であるが、これらに限定されない。本発明のマイクロアクチュエータを備える装置の一例として、光ディスク装置である装置30を説明する。

[0127] 装置30は、光源31と、コリメータレンズ32と、偏光ビームスプリッタ33と、1/4波長板34と、マイクロアクチュエータアレイ35と、対物レンズ36と、対物レンズアクチュエータ38と、波面情報生成部47と、制御部42とを備える。

[0128] 図1Bを参照して説明したように、マイクロアクチュエータアレイ35は複数のマイクロアクチュエータ10を備える。なお、マイクロアクチュエータアレイ35は、マイクロアクチュエータ10の代わりにマイクロアクチュエータ10aまたは10bを複数個備えてもよいし



、これらのマイクロアクチュエータ10、10aおよび10bを組み合わせて備えてもよい。

[0129] 制御部42は、固定電極4a〜4cに駆動電圧として制御信号を出力し、可動部7の変位(垂直変位および傾動)を制御する。制御部42は、可動部7を所望の姿勢に変位させて、ミラー部6bに入射した光の波面を変調する。

[0130] 次に、装置30の動作をより詳細に説明する。

[0131] 光源31は例えばGaNレーザ素子である。光源31から出射された光ビームは、コリメータレンズ32により無限系の光ビームに変換され、偏光ビームスプリッタ33に入射する。この光ビームのうちP偏光成分だけが偏光ビームスプリッタ33を透過し、残りのS偏光成分は反射されて前光モニター(不図示)に入射する。透過したP偏光成分は1/4波長板34によって円偏光に変換される。

[0132] マイクロアクチュエータアレイ35上には複数のマイクロアクチュエータ10が2次元アレイ状に配列されている。可動部7のそれぞれは光反射面であるミラー部6bを備え、光ビームを反射する。可動部7は、固定電極4a〜4cのそれぞれに印加された電圧の大きさに応じて変位し、光ビームの波面を局所的に変化させる。マイクロアクチュエータアレイ35に対する光の入射角および出射角は、それぞれ45度に設定されている。

[0133] マイクロアクチュエータアレイ35によって波面が変化した光ビームは、対物レンズ36によってディスク37の記録層に集光される。対物レンズアクチュエータ38は、光ビームの光軸方向および光軸に直交する方向の2方向に対物レンズ36平行移動させ、光ビームの所望の記録層への合焦と、所望の記録トラックへの追従を行う。

[0134] ディスク37は、所定の間隔で配置された複数の記録層と、記録層を覆って保護する光透過可能な基材部とを備える光記録媒体である。往復路での奇対称収差の収差情報消失を防止するため、記録層には拡散性もしくは蛍光性を持たせることがより好ましい。ディスク37の記録層で反射された光ビームは、再度マイクロアクチュエータアレイ35のミラー部6bと1/4波長板34とを通過する。この光ビームは大半がS偏光成分であるため、偏光ビームスプリッタ33によって反射され、波面情報生成部47に入射する。波面情報生成部47は、光ビームの波面状態を示す波面情報を生成する。波面情報生成部47は、ホログラム39と、レンズ40と、光検出器41とを備える。この波面情報生成部47は、ここではモーダル型の波面センサであるとして説明するが、



シャック＝ハルトマン (Shack-Hartmann) 型の波面センサであってもよいし、あるいは特開2000-155979号公報に記載されたような他の収差検出方法を用いてもよい。モーダル型の波面センサは下記の文献に開示されている。

- [0135] M. A. A. Neil, M. J. Booth, and T. Wilson, "New modal wave-front sensor: a theoretical analysis," J. Opt. Soc. Am. A / Vol. 17, No. 6, pp. 1098 - 1107 (2000)
- [0136] ホログラム39は $n$  ( $n$ は複数) 個の直交する収差モード $M_i$  ( $i=1 \sim n$ ) において、それぞれ異なる方向に $\pm 1$ 次光を生成する。予め定められたバイアス係数を $B_i$ として、各モード $M_i$ に対応するこれらの $\pm 1$ 次光の $+1$ 次光には $+B_i M_i$ 、 $-1$ 次光には $-B_i M_i$ のバイアス収差がそれぞれ付与される。
- [0137] レンズ40は、ホログラム39によって偏向された $n$ 対の光ビームを光検出器41上に集光する。レンズ40の焦点距離を $f$ とすると、ホログラム39と光検出器41とはそれぞれレンズ40の主平面より距離 $f$ の位置に配置されており、レンズ40はフーリエ変換レンズとして機能する。
- [0138] 光検出器41は各 $n$ 対の光ビームについて $\pm 1$ 次光の強度信号である差動出力信号 $S_i$ を生成し、制御部42へ出力する。収差モード $M_i$ に対応した差動出力信号 $S_i$ は収差モード $M_i$ の大きさ $A_i$ に対応する信号となる。収差モード $M_i$ に対する感度 $S_i/A_i$ はバイアス係数 $B_i$ 等の設計パラメータにより予め決定されている。
- [0139] 差動出力信号 $S_i$ は波面情報を示しており、差動出力信号 $S_i$ の大きさが光ビームの波面状態を表している。差動出力信号 $S_1$ はディスク37の基材厚変化に伴う球面収差モードに関する出力信号である。差動出力信号 $S_2$ はディスク37のラジアル方向の傾きに伴うコマ収差に主に対応した収差モードに関する出力信号である。差動出力信号 $S_3$ はディスク37のタンジェンシャル方向の傾きに伴うコマ収差に主に対応した収差モードに関する出力信号である。差動出力信号 $S_4$ は対物レンズ36のデフォーカスによる収差モードに関する出力信号である。また、差動出力信号 $S_5$ はディスク37のプリピットおよび記録マークによって変調された信号である。
- [0140] 制御部42は、差動出力信号 $S_i$ が示す波面情報に応じて可動部7を変位させる。制御部42は、波面演算部43と、レンズシフト補正演算部44と、全体制御部45と、波面



補正制御部46とを備える。好ましい実施形態では、制御部42もしくはその一部は、マイクロアクチュエータアレイ35の基台1上に設けられ、制御部42とマイクロアクチュエータアレイ35とは1チップ化されている。

[0141] 別の好ましい実施形態では、光源31、コリメータレンズ32、偏光ビームスプリッタ33、1/4波長板34、マイクロアクチュエータアレイ35、対物レンズ36、対物レンズアクチュエータ38および波面情報生成部47は光ピックアップ基台(不図示)上に配置されている。この場合は、光ピックアップ基台が基台1を兼用してもよい。また、制御部42もしくはその一部が光ピックアップ基台上に設けられていてもよい。

[0142] 波面演算部43は、差動出力信号 $S_1 \sim S_3$ を用いて、ディスク37の基材厚変化と傾きに伴う波面収差を補正するための位相関数 $\phi(x, y)$ を算出する。ここで $x, y$ はマイクロアクチュエータアレイ35のミラー位置に対応した座標である。

[0143] レンズシフト補正演算部44は、全体制御部45から対物レンズ36のレンズシフト量 $x_0$ の値を受け取り、これに基づいて位相関数 $\phi(x, y)$ を $\phi(x-x_0, y)$ に変換する。この $\phi(x-x_0, y)$ は、波面補正制御部46がマイクロアクチュエータアレイ35を制御する際の目標波面となる。

[0144] 全体制御部45は、差動出力信号 $S_4$ および $S_5$ に基づいてフォーカス制御信号 $F_0$ およびトラッキング制御信号 $Tr$ を生成し、対物レンズアクチュエータ38へ出力する。また、全体制御部45は、生成したトラッキング制御信号 $Tr$ に低域通過フィルタを通過させることにより、対物レンズ36のレンズシフト量 $x_0$ を算出する。

[0145] 波面補正制御部46は、レンズシフト補正演算部44から $\phi(x-x_0, y)$ を示す信号を受け取り、マイクロアクチュエータアレイ35の各可動部7の変位を制御するための制御信号 $D$ を $\phi(x-x_0, y)$ に応じて生成する。

[0146] マイクロアクチュエータアレイ35は、例えば $42 \times 36$ 個のマイクロアクチュエータ10を備える。この場合、マイクロアクチュエータ10のそれぞれが3つの固定電極4a~4cを備えているので、マイクロアクチュエータアレイ35は、 $42 \times 36 \times 3$ 個の固定電極を備えている。制御信号 $D$ は、 $42 \times 36 \times 3$ 個の固定電極のそれぞれに個別に与えるそれぞれの駆動電圧の大きさを示している。波面補正制御部46は、制御信号 $D$ を受け取る固定電極が可動部7に及ぼす駆動力の作用点の目標変位量に応じて、その



固定電極に与える駆動電圧の大きさを設定する。また、波面補正制御部46は、その作用点が3段階以上の多段階(例えば128段階＝7bit)の変位をすることが可能なように、駆動電圧の大きさを多段階に設定する。また、固定電極に与える駆動電圧と可動部7の変位とは一般的に非線形な関係があるので、制御信号Dにより高い分解能(例えば10bit)を持たせることで、リニアな変位が得られるような補正処理を行うことができる。制御信号Dは時系列に切り替えられる。

[0147] 可動部7中の各作用点での目標変位量の段階をn段階としたとき、非対角性の大きさ $\delta' / \delta$ が $1/n$ 以下であれば、波面補正制御部46は、非対角性に起因する変位の補正を全く行う必要がないため、極めて制御構成を簡単にすることができる。本発明のマイクロアクチュエータ10では非対角性の大きさ $\delta' / \delta$ が小さいので、固定電極の数が大量(例えば、 $42 \times 36 \times 3$ 個)であっても制御構成を簡単にすることができる。従来のマイクロアクチュエータ1000(図10)のように非対角性の大きさ $\delta' / \delta$ が大きいと、非対角性に起因する変位の補正のための演算量が膨大になってしまい、制御構成は複雑になり、著しいコストの増大を招くと共にマイクロアクチュエータの駆動速度が低下してしまう。本発明によれば、非対角性に起因する変位の補正のための演算量が非常に少なく済むので、コストの削減およびマイクロアクチュエータの駆動速度の高速化を実現することができる。本発明は多数のマイクロアクチュエータを駆動する場合に特に有用である。

[0148] なお、非対角性に起因する変位の補正を行う場合は、可動電極6の各点の目標変位量に(式13)の右辺にある行列の逆行列を掛ける操作を行い、固定電極4a～4cに発生させる駆動力を求め、求めた駆動力から駆動電圧を求めて制御信号Dを生成してもよい。この場合でも、個々のマイクロアクチュエータ10の非対角性が従来に比べてそもそも低減されているので、高い補正精度が得られやすく、個々のアクチュエータ特性のばらつきの影響による非線形補正の精度劣化も小さい。また、個々のマイクロアクチュエータ10が

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx}$$

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry}$$

を満たしている場合は、例えば上記の逆行列演算を行っても、駆動力は正(吸引力



向)の値の範囲内に解が求められ、静電力のような吸引方向にしか発生しない駆動力を用いる場合でも、波面補正制御部46は非対角性に起因する変位の補正を容易に行うことができる。

[0149] 次に、図8A～図9Bを参照して、波面近似精度が向上する可動部7中の作用点の座標位置について説明を行う。可動部7中の作用点A～Bのそれぞれは、固定電極4a～4cのうちの対応する固定電極の駆動力が発生する領域の中心を通りその固定電極に垂直な軸を通る点である。ある1つの固定電極の駆動力が発生する領域の中心は、例えばその固定電極の中心と一致する。

[0150] マイクロアクチュエータ10は2軸の傾動と1軸の垂直変位が可能である。説明の順序として、まず1軸の傾動と1軸の垂直変位を行う1次元モデルを説明し、次いで2軸の傾動と1軸の垂直変位を行う2次元モデルを説明する。

[0151] 図8A～図8Bは、可動部7中の作用点の座標位置と波面近似精度との関係を示す1次元モデルの説明図である。

[0152] まず、図8Aを参照して一般的な波面の折れ線近似方法を説明する。

[0153] 図8Aにおいて、横軸はマイクロアクチュエータ10のx方向の座標位置であり、縦軸は波面の位相である。補正目標となる位相関数 $\phi$ が2点鎖線で示されている。位相関数 $\phi$ は既に説明したように座標位置xの関数で与えられている。ミラー部6bは、基台1に対する変位と傾きとが制御可能であるから、この位相関数 $\phi$ を折れ線近似で再現することになる。隣接するミラー部6b間のピッチをPとする。ピッチP毎に座標点 $x_j$  ( $j$ は整数)をとり、隣接する2つの座標点 $x_j$ 、 $x_{j+1}$ に対する位相関数 $\phi$ の値 $\phi(x_j)$ 、 $\phi(x_{j+1})$ を結ぶことでミラー部6bの変位と傾きを求めることができる。この近似折れ線 $\phi'$ を実線で示す。この方法は演算量が少なく高速な計算処理が可能であるが、波面誤差が大きい。

[0154] 別の折れ線近似方法として、区間 $[x_j, x_{j+1}]$ 毎に、位相関数 $\phi$ からの誤差を最小にする変位と傾きとを最小自乗法で求めることが可能である。この方法によれば、波面誤差を小さくできるが、演算量が多くなる。

[0155] 図8Bを参照して、少ない演算量で補正精度を向上させることのできる波面の折れ線近似方法を説明する。ここでは、区間 $[x_j, x_{j+1}]$ 内に2点の座標点 $x_{j,a}$ 、 $x_{j,b}$ をとる。座



標点 $x_{j,a}$ 、 $x_{j,b}$ は可動部7の中央部Oを基準として対称の位置にあり、どちらも中央部Oから距離Lだけ離れた位置にある。この距離Lの値を適切な値に設定し、光反射面を座標 $(x_{j,a}, \phi(x_{j,a}))$ と $(x_{j,b}, \phi(x_{j,b}))$ との2点を通る線分として規定することを考える。

- [0156] 図8Cは、区間 $[x_j, x_{j+1}]$ における位相関数 $\phi$ の曲率半径 $\rho$ と、波面誤差を極小にする距離Lの値との関係をプロットした図である。ミラー部6bの長さをピッチPとほぼ等しいとする。無次元化した曲率半径 $\rho/P$ を横軸にとり、波面誤差を極小にする無次元化した距離L/Pを縦軸にとっている。波面誤差は長さPのミラー内における誤差の自乗の定積分値 $\int (\phi - \phi')^2 dx$ の平方根として定義される。位相関数 $\phi$ の曲率半径 $\rho$ は任意の値をとり得るが、図8Cから、波面誤差を極小にする無次元距離L/Pは、ほとんど無次元曲率半径 $\rho/P$ に依存せず、約0.29と一定の値をとることがわかる。従って、距離 $L=0.29P$ と設定した座標点 $x_{j,a}$ 、 $x_{j,b}$ を可動部7中の作用点の座標位置と一致させ、各駆動点の変位目標値を $\phi(x_{j,a})$ 、 $\phi(x_{j,b})$ とすることにより、最小自乗法を用いた方法と同程度に波面誤差を極小化することができる。また、さらに可動部7中の作用点の変位目標値を位相関数 $\phi$ から直接計算できるために、演算量を極めて低減させることができる。

- [0157] 上記の少ない演算量で補正精度を向上させることのできる波面の折れ線近似方法を2次元モデルに適用した場合を、図9を参照しながら説明する。図9は、可動部7中の作用点の座標位置と波面近似精度との関係を示す2次元モデルの説明図である。

- [0158] 図9Aは、マイクロアクチュエータアレイ35を模式的に示す平面図である。互いに隣接するミラー部6b同士のピッチはPである。ここでは、ミラー部6bの1辺の長さQは $(P/\sqrt{3})$ に等しいと近似し、隣接するミラー部6bとの間のギャップを無視している。

- [0159] 図9Bは、ミラー部6b内における位相関数 $\phi$ の曲率半径 $\rho$ と、波面誤差を極小にする距離Rの値との関係をプロットした図である。

- [0160] 図9Bの横軸には無次元化した曲率半径 $\rho/P$ をとり、縦軸には波面誤差を極小にする無次元化した無次元距離R/Pをとっている。波面誤差は正六角形ミラー面内における誤差の自乗の定積分値 $\iint (\phi - \phi')^2 dx dy$ の平方根として定義される。

- [0161] 位相関数 $\phi$ が球面を表す場合の結果を実線で示す。波面誤差を極小にする無次元距離R/Pは、ほとんど無次元曲率半径 $\rho/P$ に依存せず、約0.37と一定の値を



とることがわかる。また、上述の1次元モデルでの結果を点線で併記している。この結果は、位相関数  $\phi$  が、 $x$ 方向にのみ曲率を持ち $y$ 方向に曲率を持たない円筒面を表す場合にほぼ相当するが、既に説明したように無次元距離 $R/P$ は約0.29である。位相関数  $\phi$  が球面を表す場合を扁平率0、位相関数  $\phi$  が円筒面を表す場合を扁平率1とすれば、通常の波面はこの中間の扁平率を持つ。従って、図の斜線部で示したように、無次元距離 $R/P$ の範囲を0.29以上0.37以下とすれば良いことが判る。

[0162] このように、距離 $R$ と、ピッチ $P$ とが、

$$0.29 \leq R/P \leq 0.37$$

の関係を満たすことにより、波面誤差の近似精度を高めることができる。

[0163] 本実施形態では $R=37\mu\text{m}$ 、 $P=110\mu\text{m}$ としているため、 $R/P$ の値は0.336であり、

$$0.29 \leq R/P \leq 0.37$$

の関係を満たしている。各構成要素がこのような配置関係をとるために、作用点AーCの変位目標値は、位相関数  $\phi$  に各作用点の座標位置( $x$ ,  $y$ )を入力して直接計算するだけで求まり、波面補正制御部46が行う演算量を極めて少なくすることができる。

#### 産業上の利用可能性

[0164] 本発明のマイクロアクチュエータ、およびマイクロアクチュエータを備えた装置は、収差補正、光走査、分光等を行う光デバイス及び光ディスク装置の分野で好適に用いられる。また、チューナブルキャパシタ等の高周波回路や、可変流路等の流体制御デバイス、バイオテクノロジー等の分野でも好適に用いられる。



## 請求の範囲

- [1] 基台と、  
前記基台に対して変位可能な可動部と、  
前記可動部の前記基台に対する垂直方向の変位、および前記基台に対する傾動が可能となるように前記可動部を支持する弾性支持部と、  
前記基台に対して前記可動部を変位させる複数の駆動部とを備え、  
前記複数の駆動部は、第1の駆動部と第2の駆動部とを含み、  
前記第1の駆動部が前記可動部に及ぼす第1の駆動力の第1の作用点と、前記第2の駆動部が前記可動部に及ぼす第2の駆動力の第2の作用点との間の位置で、前記弾性支持部は前記可動部を支持しており、  
前記可動部の前記基台に対する垂直方向への変位に応じて前記弾性支持部に生じる復元力のバネ定数を $k_z$  (N/m)、  
前記可動部の前記基台に対する傾動角度に応じて前記弾性支持部に生じる復元トルクのバネ定数を $k_r$  (Nm/rad)、  
前記第1の作用点と前記第2の作用点との間の距離を $2L$  (m) とするときに、  
前記 $k_z$ と前記 $k_r$ と前記 $L$ とが、  
$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$$
  
の関係を満たす、マイクロアクチュエータ。
- [2] 基台と、  
前記基台に対して変位可能な可動部と、  
前記可動部の前記基台に対する垂直方向の変位、および前記基台に対する2軸の傾動が可能となるように前記可動部を支持する弾性支持部と、  
前記基台に対して前記可動部を変位させる複数の駆動部とを備え、  
前記複数の駆動部が前記可動部に及ぼす駆動力が作用する複数の作用点で囲まれた位置で、前記弾性支持部は前記可動部を支持しており、  
前記可動部の前記基台に対する垂直方向への変位に応じて前記弾性支持部に生



じる復元力のバネ定数を $k_z$  (N/m)、

前記可動電極の前記2軸の傾動における傾動角度に応じて前記弾性支持部に生じる復元トルクのバネ定数を $k_{rx}$  (Nm/rad) および $k_{ry}$  (Nm/rad)、

前記複数の作用点のそれぞれと前記弾性支持部が前記可動部を支持している前記位置との間の距離を $R$  (m)としたときに、

前記 $k_z$ と前記 $k_{rx}$ と前記 $k_{ry}$ と前記 $R$ とが、

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx} \leq 5,$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry} \leq 5,$$

$$0.67 \leq k_{rx} / k_{ry} \leq 1.5$$

の関係を満たす、マイクロアクチュエータ。

- [3] 前記弾性支持部は、前記可動部の概ね中央部を支持している、請求項1または2に記載のマイクロアクチュエータ。

- [4] 前記可動部の少なくとも一部は導電性を有し、  
前記複数の駆動部のそれぞれは前記可動部と対向する電極を備え、  
前記複数の駆動部のそれぞれは、前記可動部と前記電極との間に生じる静電力により前記可動部を駆動する、請求項1または2に記載のマイクロアクチュエータ。

- [5] 前記複数の駆動部は、前記弾性支持部が前記可動部を支持している位置を通り前記基台に垂直な軸を中心に概ね対称に配置されている、請求項1または2に記載のマイクロアクチュエータ。

- [6] 前記弾性支持部は、前記基台に接続された第1端部と、前記可動部に接続された第2端部とを備え、

前記第1端部と前記第2端部との間の距離を $H$ としたときに、

前記 $H$ と前記 $R$ とが、

$$0.8 \leq H / R \leq 1.6$$

の関係を満たす、請求項2に記載のマイクロアクチュエータ。

- [7] 前記第1端部と前記可動部の中央部との間の距離は、前記第2端部と前記可動部の中央部との間の距離よりも長い、請求項6に記載のマイクロアクチュエータ。

- [8] 前記弾性支持部は梁部を備え、



前記梁部は、前記梁部の延びる方向が反転している折り返し部を備える、請求項1または2に記載のマイクロアクチュエータ。

- [9] 前記折り返し部と前記可動部の中央部との間の距離は、前記弾性支持部の前記基台に接続された位置と前記可動部の中央部との間の距離よりも長い、請求項8に記載のマイクロアクチュエータ。

- [10] 前記複数の駆動部のうちの1つが前記可動部を駆動して前記可動部の一端が前記基台に近づく方向に変位した場合に、前記可動部の他端は前記基台から離れる方向に変位する、請求項1または2に記載のマイクロアクチュエータ。

- [11] 前記 $k_z$ と前記 $k_r$ と前記 $L$ とが、

$$1 \leq L^2 \cdot k_z / k_r$$

の関係を満たす、請求項1に記載のマイクロアクチュエータ。

- [12] 前記 $k_z$ と前記 $k_{rx}$ と前記 $k_{ry}$ と前記 $R$ とが、

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx},$$

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry}$$

の関係を満たす、請求項2に記載のマイクロアクチュエータ。

- [13] 請求項1または2に記載のマイクロアクチュエータを複数個備え、

前記複数のマイクロアクチュエータは、前記基台を互いに共有している、装置。

- [14] 請求項2に記載のマイクロアクチュエータを複数個備え、

前記複数のマイクロアクチュエータは、前記基台を互いに共有しており、

前記複数のマイクロアクチュエータのうちの互いに隣接するマイクロアクチュエータ同士のピッチを $P(m)$ としたときに、

前記 $P$ と前記 $R$ とが、

$$0.29 \leq R/P \leq 0.37$$

の関係を満たす、装置。

- [15] 前記複数の駆動部に制御信号を出力して、前記可動部の変位を制御する制御部をさらに備える、請求項13に記載の装置。

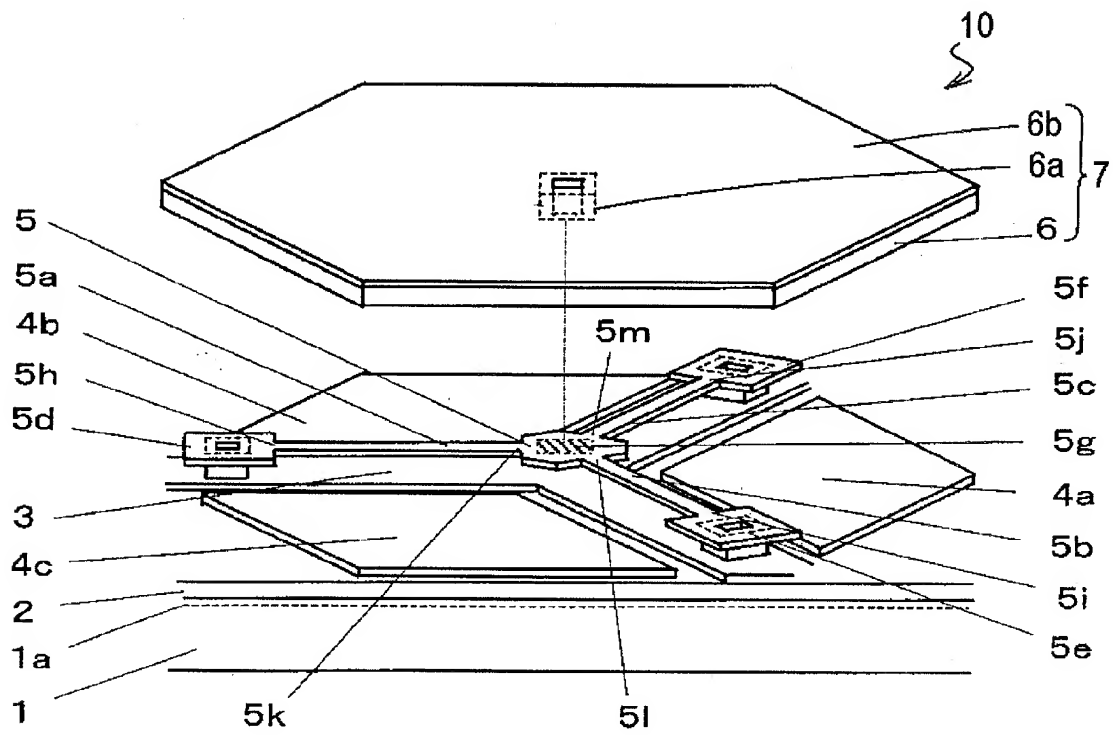
- [16] 前記制御部は、前記可動部を3段階以上に変位可能である、請求項15に記載の装置。



- [17] 前記制御部は、前記複数の駆動部のうちの前記制御信号を受け取る駆動部が前記可動部に及ぼす駆動力の作用点の目標変位量に応じた前記制御信号を出力する、請求項15に記載の装置。
- [18] 前記可動部は光反射面を備える、請求項13に記載の装置。
- [19] 光を発生する光源をさらに備える、請求項13に記載の装置。
- [20] 前記光反射面を通った光を受け取り、前記光の波面状態を示す波面情報を生成する波面情報生成部をさらに備え、  
前記制御部は、前記波面情報に応じて前記可動部を変位させる、請求項18に記載の装置。

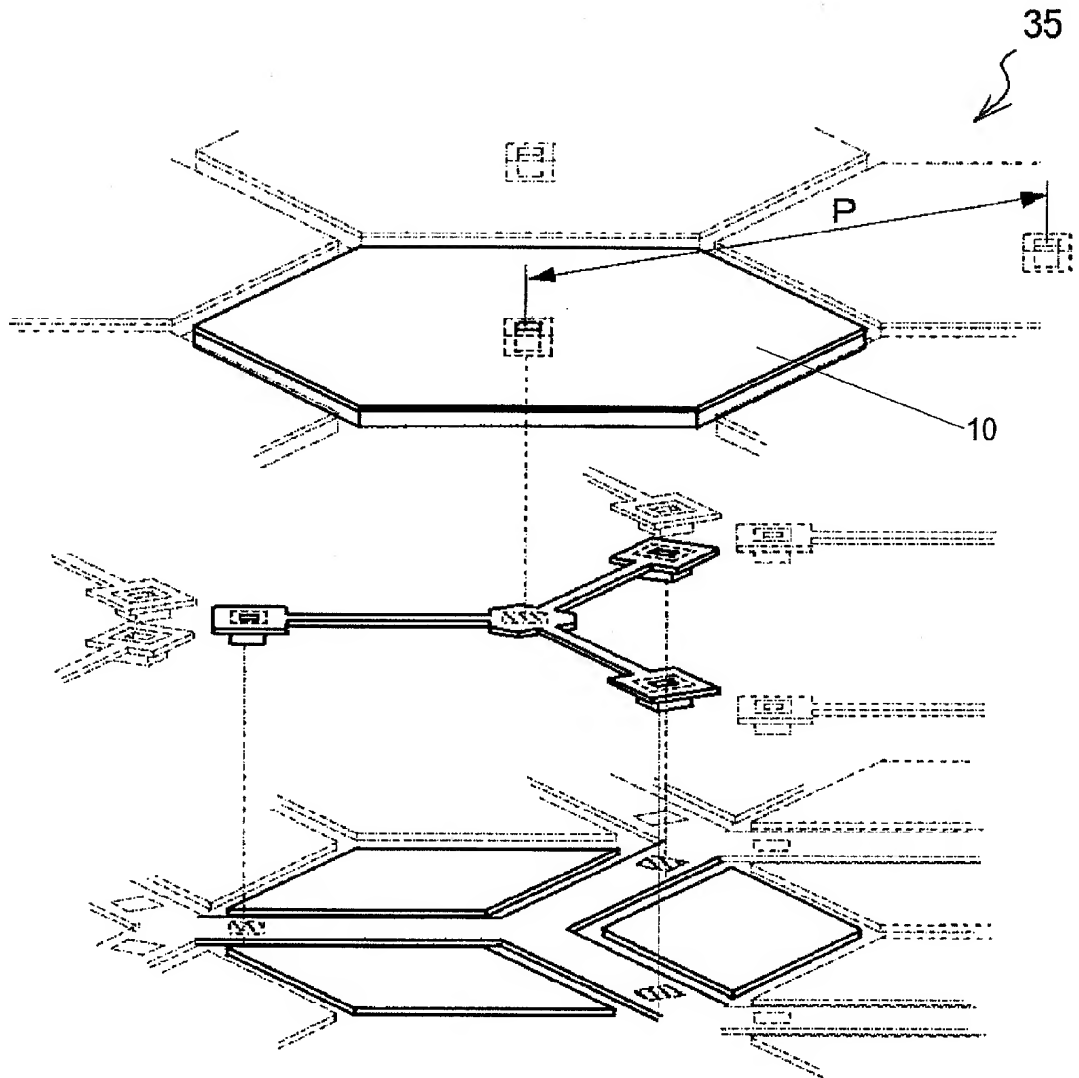


[図1A]





[図1B]





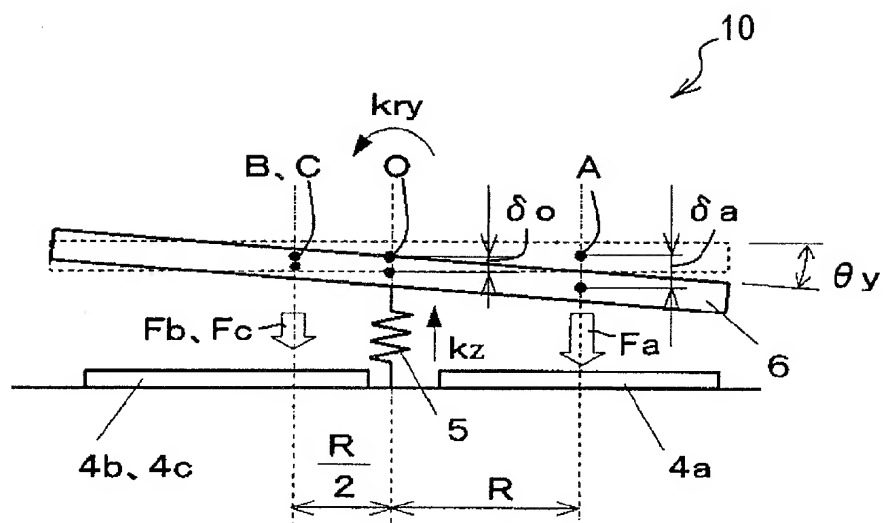






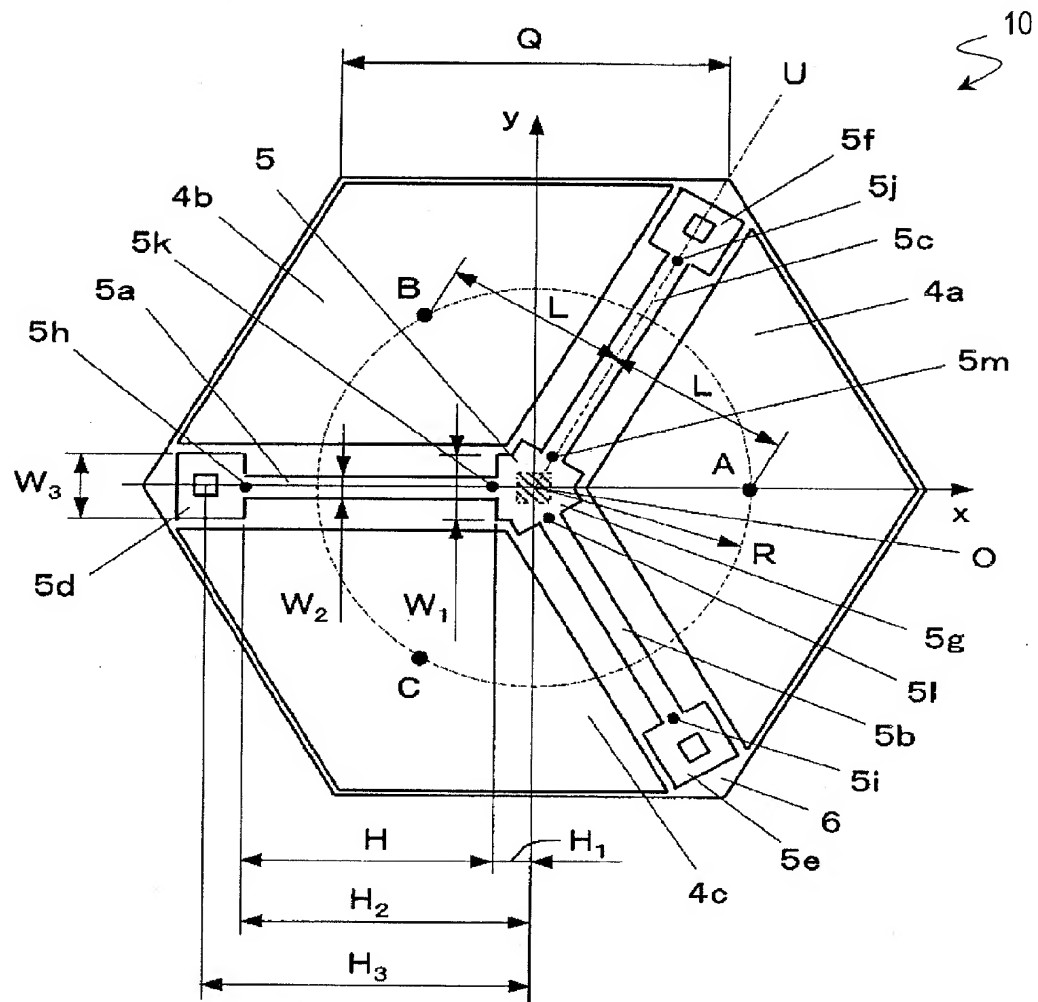


[図3C]



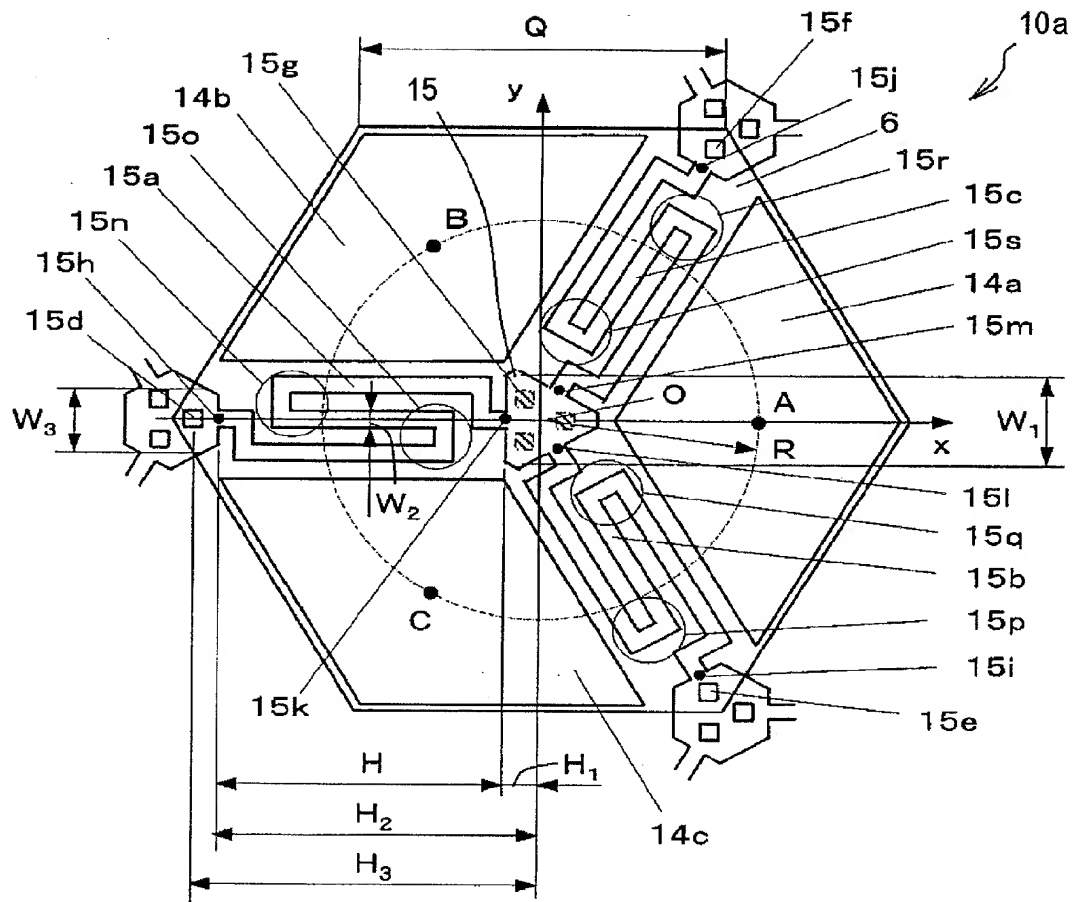


[図4]

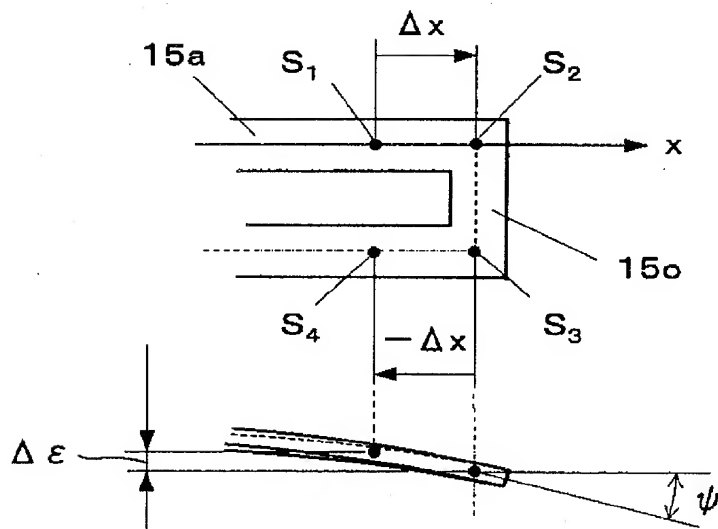




[図5A]

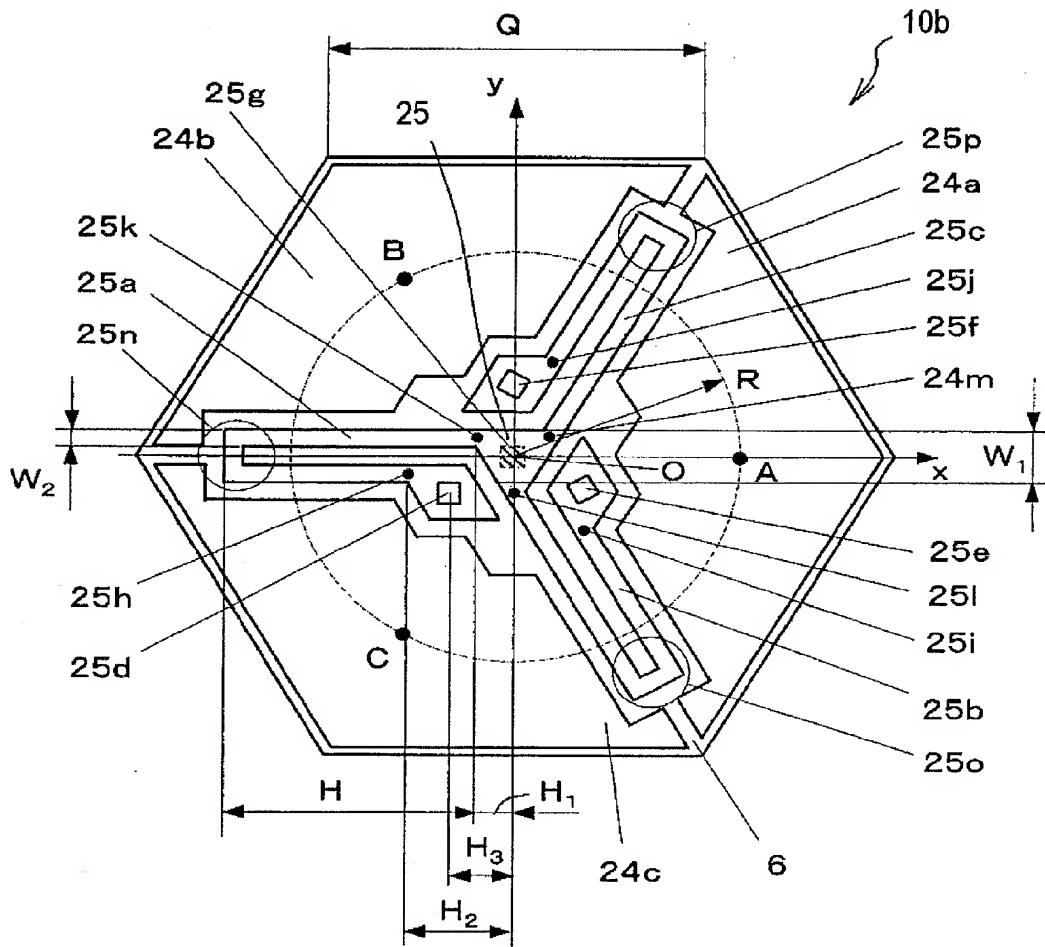


[図5B]

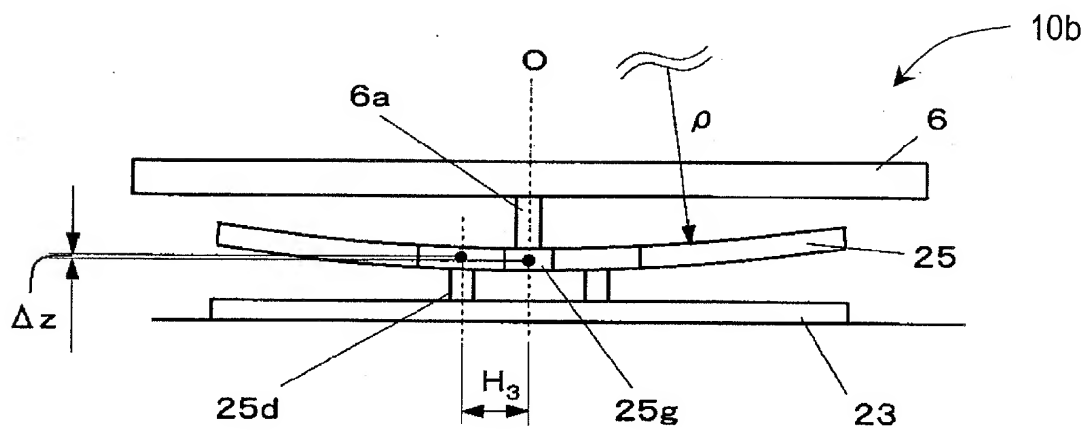




[図6A]

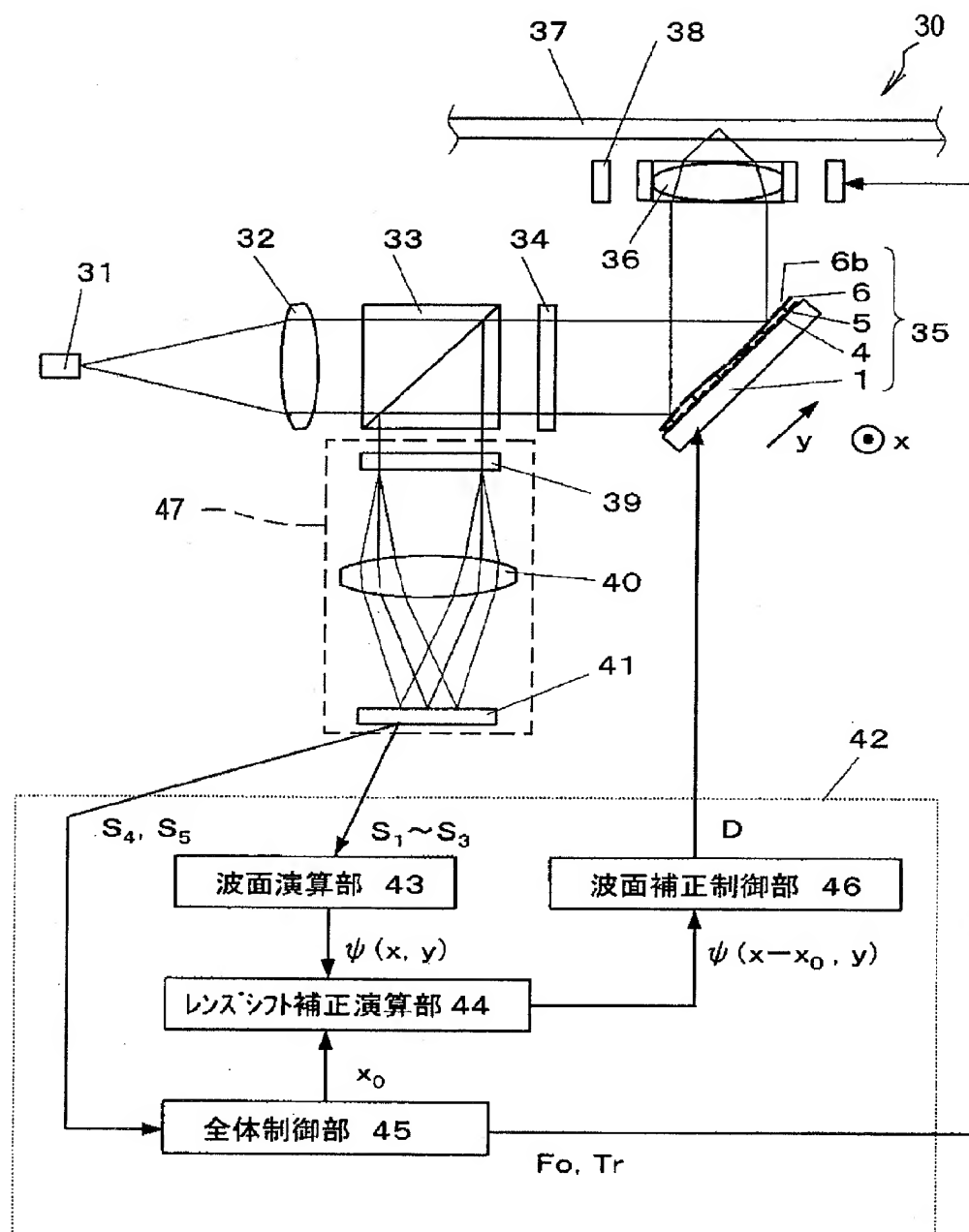


[図6B]



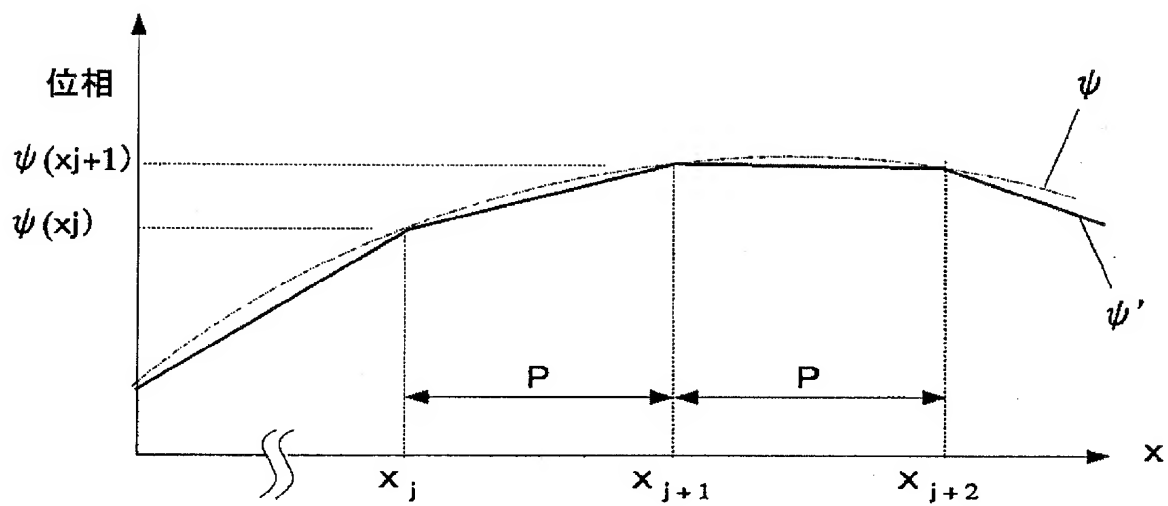


[図7]

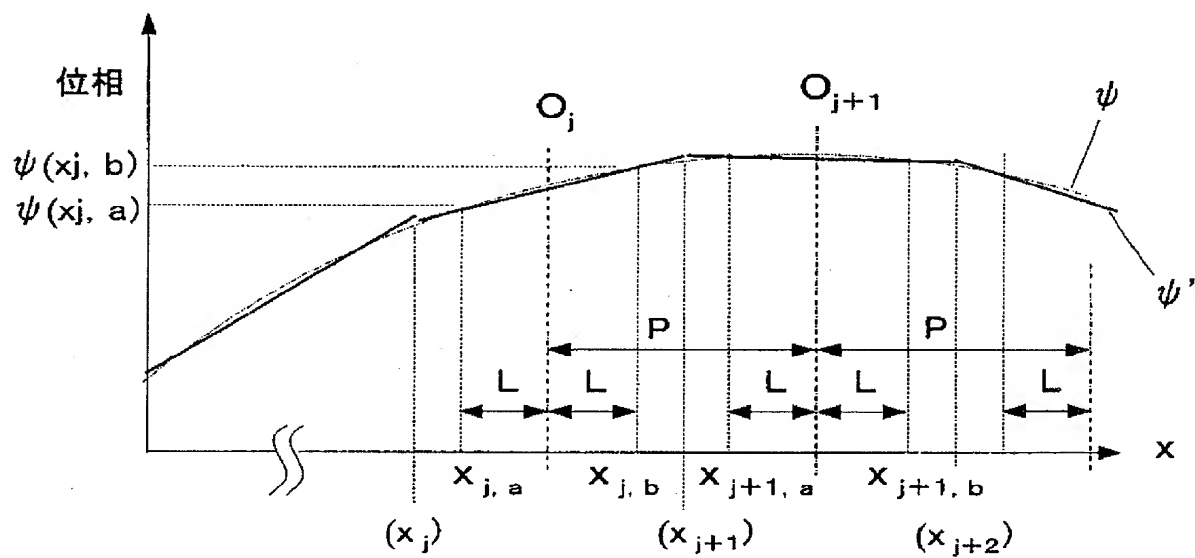




[図8A]

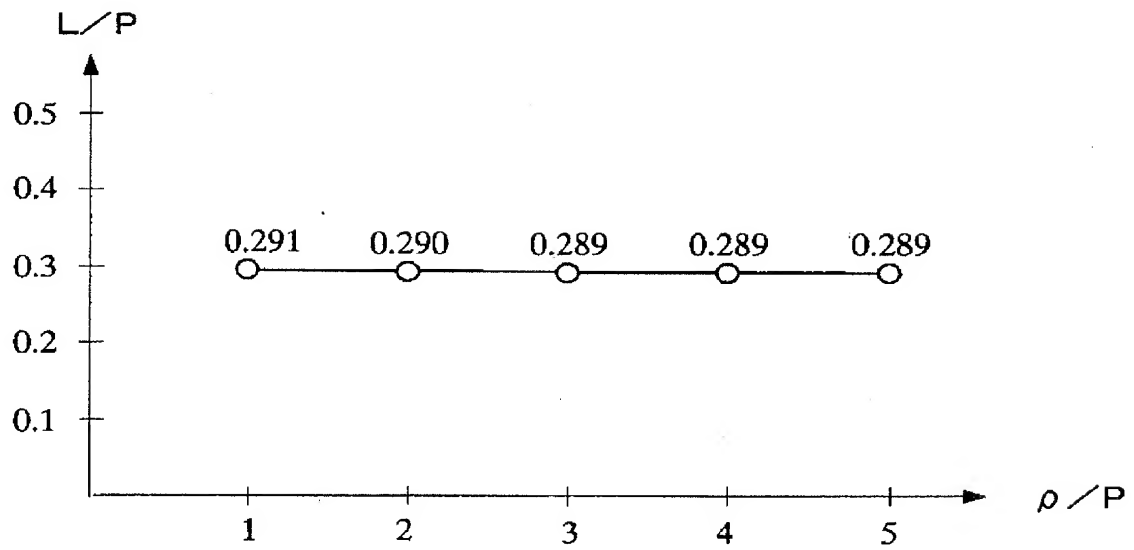


[図8B]

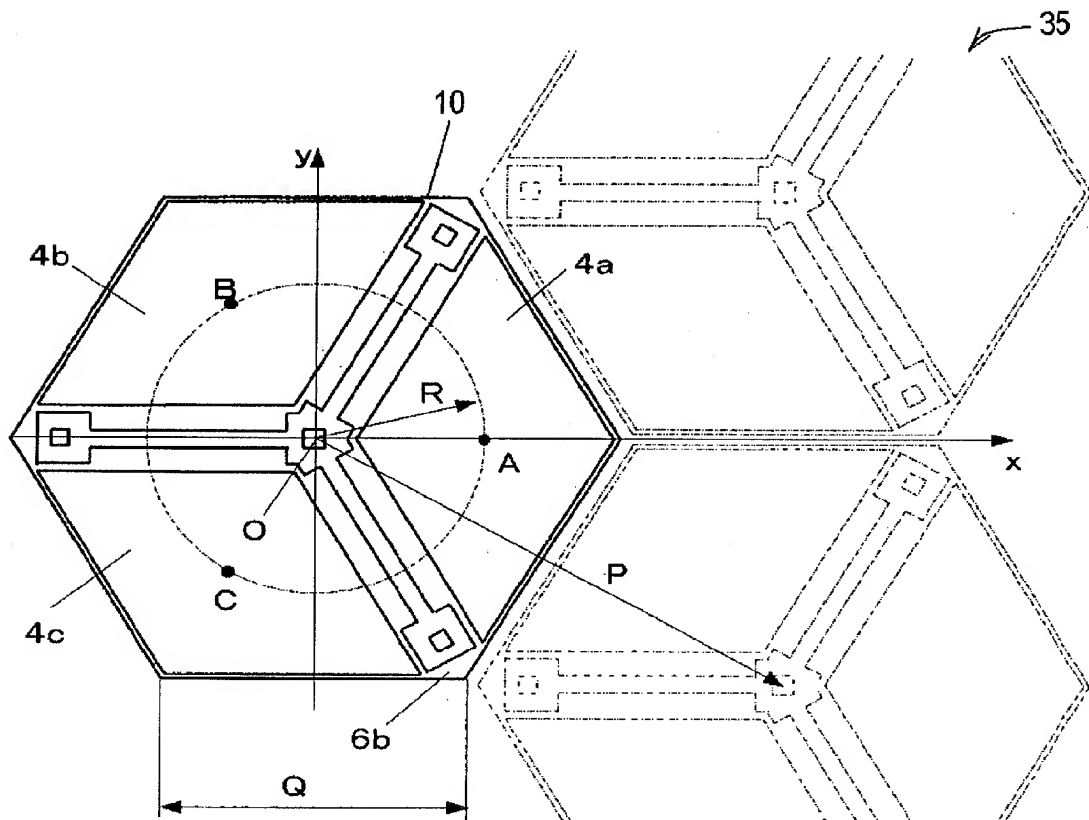




[図8C]

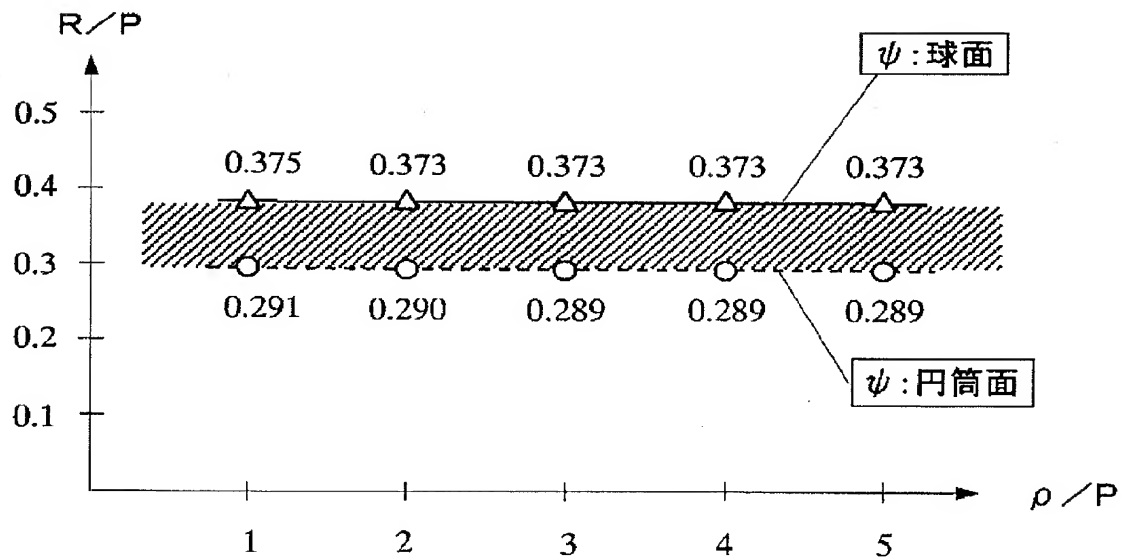


[図9A]

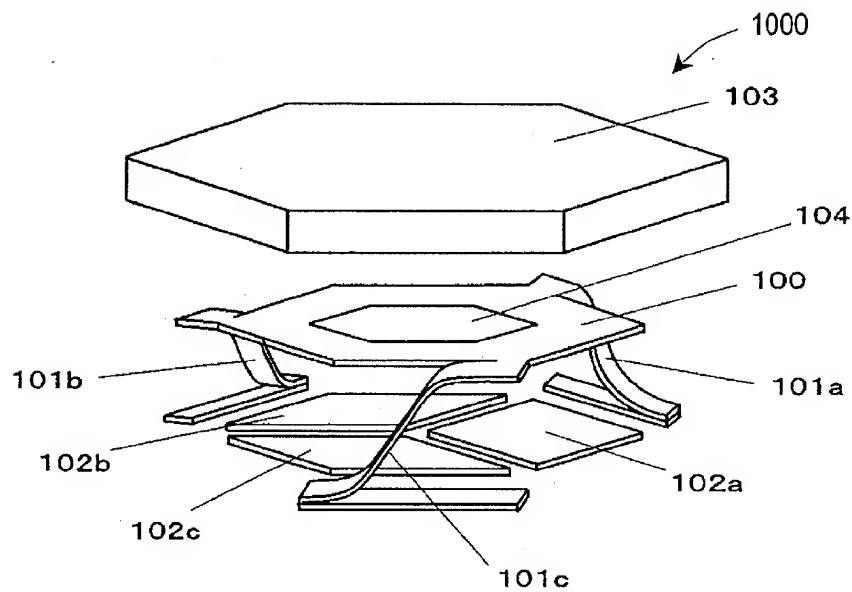




[図9B]

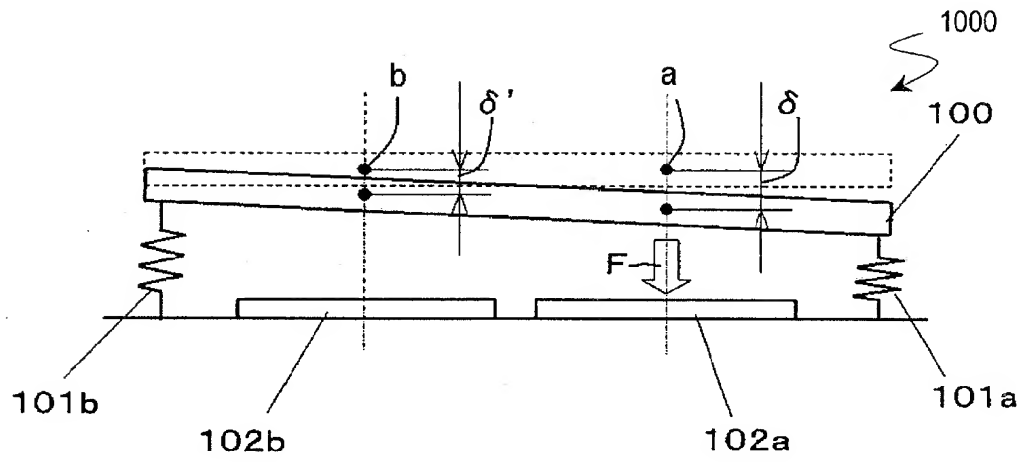


[図10]





[図11]





## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/003533

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
Int.Cl.<sup>7</sup> B81B3/00, G02B26/08

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.<sup>7</sup> B81B3/00, G02B26/08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2005	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P,A	JP 2004-102249 A (Canon Inc.), 02 April, 2004 (02.04.04), Full text & US 2004/0021924 A1	1-20
A	JP 2003-5102 A (Nikon Corp.), 08 January, 2003 (08.01.03), Full text & WO 2002/086586 A1	1-20
A	JP 2003-35874 A (Nikon Corp.), 07 February, 2003 (07.02.03), Full text (Family: none)	1-20

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

## \* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date  
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
06 April, 2005 (06.04.05)

Date of mailing of the international search report  
19 April, 2005 (19.04.05)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/003533

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2003-57575 A (Nippon Telegraph And Telephone Corp.), 26 February, 2003 (26.02.03), Full text & EP 1197779 A2	1-20



## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.<sup>7</sup> B81B3/00, G02B26/08

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.<sup>7</sup> B81B3/00, G02B26/08

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2005年
日本国実用新案登録公報	1996-2005年
日本国登録実用新案公報	1994-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
P, A	JP 2004-102249 A (キャノン株式会社) 2004. 04. 02, 全文 & US 2004/0021924 A1	1-20
A	JP 2003-5102 A (株式会社ニコン) 2003. 01. 08, 全文 & WO 2002/086586 A1	1-20
A	JP 2003-35874 A (株式会社ニコン) 2003. 02. 07, 全文 (ファミリーなし)	1-20

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&amp;」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

06. 04. 2005

国際調査報告の発送日

19. 4. 2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

塩澤 正和

電話番号 03-3581-1101 内線 3364

3 P

3319



C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 2003-57575 A (日本電信電話株式会社) 2003.02.26, 全文 & EP 1197779 A2	1-20